

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

André Filipe Sousa Campos

Desenvolvimento de uma metodologia de
fabrico de Blocos de Terra Comprimida com
incorporação de Materiais de Mudança de
Fase



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

André Filipe Sousa Campos

**Desenvolvimento de uma metodologia de
fabrico de Blocos de Terra Comprimida com
incorporação de Materiais de Mudança de
Fase**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar

Professor Doutor Francisco Ferreira Martins

Março 2021

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-Compartilhaigual
CC BY-NC-SA

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação é fruto de um percurso académico de aprendizagem, trabalho, empenho e esforço que me concedeu as bases suficientes para a sua conclusão. Mas esta caminhada não se realizou sozinha! Por isso, desde já, agradeço a todas as pessoas que me acompanharam durante esta etapa, quer a nível pessoal ou académico. Cabe-me agora expressar os mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, queria agradecer à minha família, principalmente aos meus pais que ao longo da minha vida, sempre proporcionaram as melhores condições para que pudesse fazer o meu percurso até este dia, a eles que sempre me apoiaram, acompanharam e souberam compreender por vezes a minha ausência. Sem eles nada disto seria possível. Um agradecimento muito especial à minha namorada por sempre me apoiar e me motivar nos momentos mais difíceis.

Aos orientadores desta dissertação, o Professor José Luís Barroso de Aguiar e o Professor Francisco Ferreira Martins, pela excelente orientação que me forneceram, pela partilha de conhecimento científico, pela disponibilidade, atenção e simpatia que sempre demonstraram.

Ao Engenheiro Carlos de Jesus por todo o acompanhamento e apoio prestado, nomeadamente as sugestões e conselhos que me deu ao longo da realização da dissertação.

A todos os técnicos do laboratório do Departamento de Engenharia Civil pela disponibilidade dispensada e boa disposição que demonstraram, nomeadamente, ao António Matos, César Gonçalves, José Gonçalves, Marco Jorge e Carlos Palha.

A todos os meus amigos e colegas pelo apoio prestado, quer a nível académico ou pessoal, e pela boa disposição que sempre demonstraram.

À Universidade do Minho e à Direção de Curso de Engenharia Civil por todo o apoio prestado durante o ciclo de estudos.

Por fim agradeço a todas as pessoas que contribuíram, quer direta ou indiretamente, durante todo este percurso académico.

A todos agradeço e dedico o resultado deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

A construção em terra é uma técnica utilizada em todo o mundo. É uma solução que apresenta diversas vantagens quando comparada com outras soluções construtivas, nomeadamente um baixo valor de energia incorporada, bom desempenho térmico e acústico, elevada resistência ao fogo e custo relativamente baixo. Este tipo de construção é muito versátil visto permitir a utilização de muitas técnicas diferentes, sendo a alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC) uma das técnicas mais recentes e a que serviu de base para esta dissertação.

O BTC é uma melhoria da técnica de adobe e consiste em compactar mecanicamente solo em um molde para diminuir a porosidade e aumentar a resistência do material. Apesar disso, uma das limitações é a diminuta adequabilidade dos solos disponíveis localmente, surgindo assim a estabilização dos mesmos como forma de melhorar as suas propriedades.

A inserção de material de mudança de fase (PCM) tem como objetivo os BTC's armazenarem grandes quantidades de energia e dessa forma reduzir as flutuações de temperatura interior, reforçando assim o conforto térmico e reduzindo as necessidades energéticas associadas à climatização, indo assim ao encontro de uma construção que além de sustentável se tornará inovadora.

De forma a dar desenvolvimento a investigações anteriores, nesta dissertação realizou-se uma campanha experimental definindo pontos importantes para diversas misturas de solo, água, cimento e PCM, tais como a caracterização do solo, a definição de uma metodologia para a incorporação de PCM nos BTC's, as propriedades físicas e mecânicas dos blocos, e o comportamento dos BTC's quando submetidos a diversas temperaturas.

PALAVRAS-CHAVE: Blocos de terra comprimida; Materiais de mudança de fase; Durabilidade; Propriedades físicas e mecânicas.

ABSTRACT

Earth based construction is a technique used around the world. It is a solution that presents several advantages when compared to other construction solutions, namely a low value of incorporated energy, good thermal and acoustic performance, high resistance to fire and relatively low cost. This type of construction is very versatile since it allows the use of many different techniques, the masonry of compressed earth blocks (CEB) being one of the most recent techniques and the one that served as the basis for this dissertation.

CEB is an improvement of the adobe technique and consists of mechanically compacting soil in a mold to decrease porosity and increase the material's resistance. In spite of this, one of the limitations is the reduced suitability of the locally available soils, thus resulting in their stabilization as a way to improve their properties.

The insertion of phase change material (PCM) aims at CEB to store large amounts of energy and thus reduce fluctuations in interior temperature, thus reinforcing thermal comfort and reducing energy needs associated with air conditioning, thus meeting a construction that in addition to being sustainable will become innovative.

In order to give development to previous investigations, this dissertation carried out an experimental campaign defining important points for different mixtures of soil, water, cement and PCM, such as the characterization of the soil, the definition of a methodology for the incorporation of PCM in CEB, the physical and mechanical properties of the blocks, and the behavior of CEB when subjected to different temperatures.

KEYWORDS: Compressed earth blocks; Phase change materials; Durability; Physical and mechanical properties.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos da dissertação	2
1.3	Descrição da dissertação	2
2	A Construção em Terra	4
2.1	Conceito e origens.....	4
2.2	Materiais.....	9
2.2.1	O solo.....	9
2.2.2	Teor de água	10
2.2.3	Métodos de estabilização do solo	10
2.2.3.1	Estabilização física	11
2.2.3.2	Estabilização mecânica	11
2.2.3.3	Estabilização química.....	12
2.3	Técnicas Construtivas.....	12
2.3.1	Taipa.....	14
2.3.2	Tabique	16
2.3.3	Adobe.....	16
2.4	Vantagens e inconvenientes da Construção em Terra.....	18
2.4.1	Vantagens	18
2.4.2	Inconvenientes	19
2.5	Análise do Solo.....	20
2.6	Regulamentação	20
3	Blocos de Terra Comprimida	21
3.1	Enquadramento	21
3.2	Características dos BTC	23

3.2.1	Blocos sólidos.....	23
3.2.2	Blocos ocos	24
3.2.3	Blocos perfurados.....	24
3.2.4	Blocos interligados.....	25
3.2.5	Blocos parasísmicos	25
3.3	Benefícios da construção em BTC	26
3.4	Fabrico	27
3.4.1	Equipamentos	30
3.5	Composições do solo para o fabrico de BTC	31
4	Materiais de Mudança de Fase.....	33
4.1	Enquadramento	33
4.2	Conceito	33
4.3	Classificação dos PCM	34
4.3.1	PCM's orgânicos.....	35
4.3.2	PCM's inorgânicos.....	36
4.3.3	PCM's de misturas eutéticas	37
4.4	Modos de incorporação dos PCM nos materiais	38
4.4.1	Processo de impregnação.....	38
4.4.2	Processo de imersão	38
4.4.3	Processo de encapsulamento.....	38
4.4.3.1	Macroencapsulamento.....	39
4.4.3.2	Microencapsulamento.....	39
4.5	Aplicação de PCM's na construção	41
5	Campanha experimental	44
5.1	Enquadramento	44
5.2	Escolha do solo	44

5.2.1	Ensaio expedito de sedimentação	45
5.2.2	Equivalente de areia	47
5.2.3	Ensaio expedito da bola	47
5.3	Recolha do solo e determinação da massa volúmica <i>in situ</i>	48
5.4	Ensaio laboratoriais	50
5.4.1	Análise granulométrica com sedimentação.....	50
5.4.2	Limites de consistência.....	55
5.4.3	Ensaio de compactação Proctor	56
5.4.4	Equivalente de areia	58
5.4.5	Azul-de-metileno	59
5.4.6	Densidade das partículas sólidas	60
5.4.7	Análise química	61
5.5	Outros elementos para a mistura dos BTC	62
5.6	Dimensionamento das misturas.....	63
5.7	Fabrico dos BTC.....	66
5.8	Metodologia de incorporação do PCM nos BTC	68
5.9	Ensaio realizados aos BTC	70
5.9.1	Ensaio à compressão preliminar	70
5.9.2	Ensaio de compressão e módulo de elasticidade	72
5.9.3	Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	77
5.9.4	Ensaio de absorção de água por imersão	82
5.9.5	Ensaio da erosão à chuva	84
5.9.6	Ensaio à compressão após o ensaio da erosão da chuva	89
5.9.7	Ensaio de termogravimetria	91
5.10	Análise de resultados	93
6	Conclusão.....	95

6.1	Conclusões gerais	95
6.2	Investigação futura a desenvolver	96
7	Referências bibliográficas	97
8	ANEXOS	102
8.1	ANEXO 1: Ficha técnica do cimento CEM I 42,5R	103
8.2	ANEXO 2: Ficha técnica do Material de Mudança de Fase (RT22HC)	105
8.3	ANEXO 3: Ficha técnica dos tijolos convencionais	112
8.4	ANEXO 4: Simulador da chuva.....	113
8.5	ANEXO 5: Resultados dos ensaios de termogravimetria.....	114

Índice de Figuras

Figura 2.1: Construção em terra a nível mundial	5
Figura 2.2: Troço da Grande Muralha da China	5
Figura 2.3: Cidade de Shibam, Iémen	6
Figura 2.4: Mesquita de Djenné, Mali	6
Figura 2.5: Pirâmide do Sol, México	7
Figura 2.6: Castelo de Paderne	7
Figura 2.7: Castelo de Silves	7
Figura 2.8: Construção em terra: a) ETAR em Évora; b) adega em Beja	8
Figura 2.9: Principais técnicas construtivas usadas em Portugal Continental: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique	8
Figura 2.10: Diagrama estabelecido pelo CRATerre das diferentes técnicas construtivas	13
Figura 2.11: Construção em taipa: a) cofragem de madeira; b) compactação tradicional	14
Figura 2.12: Diferentes métodos de compactação	14
Figura 2.13: Construção em taipa: a) novo edifício da empresa Ricola, Suíça; b) piscina coberta com paredes exteriores em taipa à vista, Espanha; c) habitação moderna em taipa, Beja	15
Figura 2.14: Construção em taipa: a) cofragens metálicas; b) compactação com pilões mecanizados	15
Figura 2.15: Execução de tabique em paredes e tetos	16
Figura 2.16: Habitações antigas em tabique	16
Figura 2.17: Desmoldagem dos blocos de adobe	17
Figura 2.18: Fases de construção de alvenarias em adobe: a) Elevação das paredes exteriores e interiores; b) Construção até à cota dos vãos; c) Marcação dos vãos; d) Construção até receber os elementos da cobertura	17
Figura 2.19: Construção em adobe: a) Cúpula e arco; b) abóbada	18
Figura 2.20: Condutibilidade térmica associada à taipa, betão e tijolo, respetivamente	19
Figura 2.21: Resistência à flexão associada à taipa não estabilizada, taipa estabilizada, betão, e tijolo	19
Figura 3.1: Blocos de adobe [38] vs blocos de terra comprimida	21
Figura 3.2: Prensa original CinvaRam	22
Figura 3.3: Construção de alvenarias com recurso a BTC, Alentejo	22
Figura 3.4: Cura dos BTC em ambiente húmido	23

Figura 3.5: Blocos sólidos	24
Figura 3.6: Blocos ocos	24
Figura 3.7: Blocos perfurados	25
Figura 3.8: Blocos interligados	25
Figura 3.9: Blocos parasísmicos	26
Figura 3.10: Detalhes construtivos em BTC	26
Figura 3.11: Habitação construída em BTC interligado em 64 horas, Índia	27
Figura 3.12: Composição dos BTC	27
Figura 3.13: Preparação do solo: a) Pulverizador mecânico de pás; b) Peneiro manual; c) Solo após pulverização e peneiração	28
Figura 3.14: Moldagem do BTC: a) Colocação da mistura na prensa; b) Bloco moldado	29
Figura 3.15: Processo de fabrico dos BTC	30
Figura 3.16: Pressas manuais para o fabrico dos BTC	30
Figura 3.17: Pressas hidráulicas para o fabrico dos BTC: a) fixa; b) móvel	31
Figura 4.1: Diagrama de mudança de fase sólido-líquido	34
Figura 4.2: Capacidade de armazenamento de energia de alguns materiais	34
Figura 4.3: Classificação dos PCM	35
Figura 4.4: Diferentes tipos de macrocápsulas	39
Figura 4.5: Microcápsula de PCM vista ao microscópio (ampliada 500 vezes)	40
Figura 4.6: Processos de microencapsulamento	40
Figura 4.7: Morfologia das microcápsulas: a) mononuclear; b) polinuclear; c) matriz	41
Figura 4.8: Diferentes alvenarias com a mesma capacidade de armazenamento de energia	42
Figura 4.9: Variação da temperatura no Inverno	42
Figura 4.10: Variação de temperatura no Verão	43
Figura 5.1: Amostras de solo recolhidas: a) Várzea; b) Gamil; c) Midões; d) Sequeade	44
Figura 5.2: Mapa com a indicação das freguesias onde foram recolhidas as amostras	45
Figura 5.3: Aspeto final dos solos nas provetas no final do ensaio expedito da sedimentação: a) Várzea; b) Gamil; c) Midões; d) Sequeade	46
Figura 5.4: Bolas formadas com o ensaio: a) Várzea; b) Gamil; c) Midões; d) Sequeade	48
Figura 5.5: Aspeto visual do solo escolhido	49
Figura 5.6: Processo de extração do solo para a determinação da massa volúmica	49
Figura 5.7: Homogeneização, esquartejamento e embalagem do solo	50

Figura 5.8: Processo de ensaio granulométrico: a) peneiração do solo; b) aquecimento da amostra; c) agitação da mistura; d) transferir a solução para peneiro #200; e) lavagem da mistura; f) medição da suspensão	52
Figura 5.9: Curva granulométrica do solo.....	53
Figura 5.10: Fuso granulométrico apresentado por Viana da Fonseca com a curva do solo de Gamil	54
Figura 5.11: Fuso granulométrico apresentado por Houben & Guillaud com a curva do solo de Gamil	54
Figura 5.12: Fuso granulométrico apresentado pela norma espanhola UNE 41410 com a curva do solo de Gamil	55
Figura 5.13: Processo de determinação do limite de liquidez: a) pesagem; b) amassadura; c) moldagem	56
Figura 5.14: Resultado do ensaio do limite de liquidez	56
Figura 5.15: Procedimento do ensaio proctor: a) adicionar água ao solo; b) uniformização e divisão do solo em 5 porções; c) compactação pesada do solo; d) rasar o provete; e) aspeto de provete ensaiado; f) recolha da amostra	58
Figura 5.16: Resultado do ensaio proctor	58
Figura 5.17: Processo de determinação do equivalente de areia: a) mistura do solo com o floculante; b) agitar a mistura com recurso de um agitador mecânico manual; c) leituras do equivalente de areia.....	59
Figura 5.18: Processo de determinação do azul-de-metileno: a) misturar o solo; b) misturar com o corante; c) resultado.....	60
Figura 5.19: Processo de determinação da massa volúmica: a) medição da temperatura; b) pesagem da amostra; c) fervura da amostra; d) pesagem da amostra após a fervura.....	61
Figura 5.20: Analisador FRX EA1000VX	61
Figura 5.21: Ensaio da bola da mistura solo, cimento e água: a) 5% cimento; b) 10% cimento; c) 20% cimento.....	64
Figura 5.22: Ensaio da bola da mistura solo, cimento, PCM e água: a) 25% PCM; b) 50% PCM; c) 75% PCM	66
Figura 5.23: Processo de fabrico da mistura: a) misturar a mistura seca; b) adicionar água à mistura; c) misturar o material seco.....	66
Figura 5.24: Prensa manual "Terstaram"	67

Figura 5.25: Processo de prensagem do BTC: a) introdução da mistura no molde; b) nivelamento da mistura; c) BTC prensado dentro do molde; d) BTC prensado fora do molde.....	67
Figura 5.26: Processo de cura dos BTC	68
Figura 5.27: Aquecimento da prensa	68
Figura 5.28: Processo de fabrico da mistura: a) misturadora e secador utilizados; b) adicionar o solo e o cimento; c) adicionar o PCM e a água à mistura; d) verificação da temperatura da mistura	70
Figura 5.29: Ensaio à compressão simples: a) preparação do BTC; b) realização do ensaio; c) rotura do BTC.....	71
Figura 5.30: Resultados aos 14 dias com incorporação de cimento.....	72
Figura 5.31: Retificação dos BTC's: a) desgaste numa superfície rugosa; b) desgaste numa superfície lisa; c) e d) espalhamento do betume de poliéster; c) nivelamento do betume de poliéster	73
Figura 5.32: Ensaio à compressão: a) alinhamento do BTC no prato; b) colocação dos LVDT's; c) BTC pronto a ser ensaiado; d) aparecimento das primeiras fissuras no BTC; e) BTC atingiu a rotura	74
Figura 5.33: Resistência à compressão dos BTC's	75
Figura 5.34: Representação das curvas carga-deformação	76
Figura 5.35: Módulo de elasticidade dos BTC's	77
Figura 5.36: Procedimento de ensaio de absorção de capilaridade: a) e b) BTC's colocados à absorção por capilaridade; c) colocação dos BTC's numa superfície não absorvente; d) pesagem dos BTC's.....	78
Figura 5.37: Ensaio à absorção por capilaridade da mistura de referência: a) ao fim de 60 minutos; b) ao fim de 120 minutos	79
Figura 5.38: Resultados do comportamento da absorção de água por capilaridade.....	79
Figura 5.39: Regressão linear da absorção de água por capilaridade	80
Figura 5.40: Coeficiente de absorção de água por capilaridade	81
Figura 5.41: Comparação entre a resistência à compressão e o coeficiente de absorção de água por capilaridade.....	81
Figura 5.42: Procedimento do ensaio de absorção de água por imersão: a) imersão dos BTC's; b) pesagem do provete saturado; c) pesagem hidrostática	82

Figura 5.43: Ensaio à absorção por imersão da mistura de referência: a) ao fim de 60 minutos; b) ao fim de 120 minutos	83
Figura 5.44: Valores da absorção de água por imersão	84
Figura 5.45: Comparação entre a resistência à compressão e a absorção de água por imersão	84
Figura 5.46: Procedimento de ensaio da erosão à chuva: a) BTC pronta a ser ensaiado; b) BTC a ser ensaiado.....	85
Figura 5.47: Ensaio à erosão da chuva da mistura de referência ao fim de: a) 5 minutos; b) 10 minutos; c) 15 minutos; d) 20 minutos	86
Figura 5.48: Desgaste devido à erosão à chuva ao fim dos três ciclos das diferentes misturas: a) 10% cimento; b) 10% cimento+25%PCM; c) 10% cimento+50%PCM; d) 10% cimento+75%PCM	87
Figura 5.49: Desgaste por erosão da chuva	88
Figura 5.50: Absorção por chuvas.....	88
Figura 5.51: Comparação entre a resistência à compressão e o desgaste por erosão	89
Figura 5.52: Comparação entre as resistências à compressão antes e depois do ensaio à chuva	90
Figura 5.53: Procedimento de ensaio da termogravimetria: a) equipamento utilizado; b) BTC depois de ser ensaiado; c) registo dos resultados ao longo do ensaio	91
Figura 5.54: Aspeto visual antes e depois do ensaio de termogravimetria: a) e b) mistura de referência; c) e d) mistura 10%CEM + 25%PCM; e) e f) mistura 10%CEM + 50%PCM; g) e h) mistura 10%CEM + 75%PCM	92
Figura 5.55: Resultado do ensaio de termogravimetria	93

Índice de tabelas

Tabela 2.1: Técnicas de construção em terra	13
Tabela 2.2: Comparação das emissões de diferentes materiais de construção.....	19
Tabela 3.1: Composição ideal do solo	32
Tabela 4.1: Características térmicas de PCM's orgânicos	36
Tabela 4.2: Características térmicas de PCM's inorgânicos.....	37
Tabela 4.3: Características térmicas de PCM's de misturas eutéticas.....	37
Tabela 5.1: Resultados do ensaio expedito da sedimentação (medidas em centímetros)	46
Tabela 5.2: Resultados do ensaio expedito do equivalente de areia.....	47
Tabela 5.3: Resultados do ensaio expedito da bola.....	48
Tabela 5.4: Percentagens da curva granulométrica	53
Tabela 5.5: Composição química do solo	62
Tabela 5.6: Quantidades da mistura: solo, cimento e água (kg/m ³)	64
Tabela 5.7: Quantidades da mistura: solo, cimento, água e PCM (kg/m ³).....	65
Tabela 5.8: Temperatura dos componentes da mistura	69
Tabela 5.9: Resistência mínima à compressão.....	71
Tabela 5.10: Resultados aos 14 dias com incorporação de cimento	72
Tabela 5.11: Resultados da resistência à compressão dos BTC's	75
Tabela 5.12: Resultado do módulo de elasticidade dos BTC's.....	76
Tabela 5.13: Resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade	80
Tabela 5.14: Resultados da absorção de água por imersão	83
Tabela 5.15: Resultados do desgaste por erosão e a absorção por chuvas.....	87
Tabela 5.16: Comparação entre as compressões antes e depois do ensaio à chuva	90

Índice de siglas e abreviaturas

a.C.	Antes de Cristo
d.C	Depois de Cristo
BTC	Bloco de Terra Comprimida
°C	Graus Celcius
mm	Milímetros
cm	Centímetros
kg	Quilograma
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
USA	Estados Unidos da América
PCM	Materiais de mudança de fase (Phase Change Materials)
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (National Aeronautics and Space Administration)
μm	Micrómetro
LEST	Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
g	Gramas
ml	Mililitro
kj	Quilojoule
NP	Não plástico
W	Água
S	Solo
C	Cimento
γ_w	Massa volúmica da água
γ_s	Massa volúmica do solo
γ_c	Massa volúmica do cimento
γ_{PCM}	Massa volúmica do material de mudança de fase
FRX	Fluorescência de Raios X
UNE	Associação Espanhola de Normalização e Certificação (Asociación Española de Normalización)
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear (Linear Variable Differential Transformer)
DTG	Derivada da Termogravimetria

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A construção em terra está patente em todo o mundo e representa uma grande percentagem do património construído, sendo uma forma de construir bastante antiga. No entanto, apesar das suas inúmeras vantagens a nível económico, ambiental e social, é muitas vezes menosprezada por estar ainda associada à construção de países em desenvolvimento ou à memória de pobreza económica.

As potencialidades da terra como material de construção são inúmeras. É uma matéria-prima abundante e fácil de extrair e utilizar sem equipamentos complexos, cujo custo associado é reduzido. A sua extração e utilização não danificam os ecossistemas envolventes, não libertam dióxido de carbono e têm um consumo energético reduzido. As propriedades higrótérmicas da terra proporcionam um bom isolamento térmico e acústico, uma autorregulação do teor de humidade no interior das construções e ainda uma elevada resistência ao fogo. A construção em terra permite conservar a tradição da construção mundial, e ainda apresenta enormes possibilidades arquitetónicas. Assim, a terra apresenta-se como uma solução construtiva acessível às populações carenciadas e sobretudo, uma solução construtiva sustentável, sendo o seu principal obstáculo, a fraca resistência à água.

As técnicas da construção em terra são inúmeras e variam de região para região conforme as características de cada lugar. Em Portugal, as mais comuns são: a taipa, o tabique, a alvenaria de adobe e mais recentemente a alvenaria de blocos de terra compactada. Esta última técnica pode ser considerada como uma evolução dos blocos de adobe devido à compactação do material durante a sua produção. Para além da melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade face ao adobe, a compactação do material confere aos BTC's uma elevada estabilidade dimensional, um acabamento liso e a possibilidade de aplicação em obra, sem necessidade de revestimento. Os BTC's podem ter funções estruturais, ou serem utilizados como material de enchimento. É prática comum recorrer-se à estabilização da terra com diferentes produtos, sendo os mais comuns o cimento e a cal.

Aos BTC's podem ser incorporados vários materiais. Nesta dissertação serão incorporados PCM, o que contribui beneficemente para a sustentabilidade, pois a incorporação destes materiais na construção é uma solução construtiva que ajuda a que o conforto térmico no interior dos edifícios seja alcançado sem que haja necessidade de recorrer a equipamentos de climatização, ou que o

uso destes seja minimizado, pois o PCM tem uma elevada capacidade de armazenamento de calor, o que permite que os edifícios possuam uma elevada inércia térmica.

1.2 Objetivos da dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo dar continuidade aos trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos na Universidade do Minho, com o intuito de aprofundar os conhecimentos acerca da solução de BTC com a incorporação de PCM, bem como, contribuir para a sua adequada caracterização, tornando assim possível implementar esta solução em futuras construções.

Os principais focos desta dissertação são desenvolver uma metodologia de fabrico de BTC's com a incorporação de PCM, pois este à temperatura ambiente encontra-se no estado sólido, mas para o fabrico dos BTC's, para poder adicionar o PCM à mistura, este tem de estar no estado líquido para existir uma mistura homogénea; avaliar as propriedades físicas e mecânicas de misturas fabricadas com diferentes quantidades de PCM através de ensaios laboratoriais para determinar a sua resistência à compressão, o módulo de elasticidade e outros parâmetros relacionados com a durabilidade dos BTC's; e por fim analisar o comportamento dos BTC's com as diferentes quantidades de PCM quando submetidos a diversas temperaturas através do ensaio de termogravimetria.

1.3 Descrição da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em 8 capítulos, sendo que o presente, a introdução corresponde ao primeiro capítulo. Neste capítulo é efetuado um enquadramento do estudo realizado, assim como a apresentação dos objetivos pretendidos.

No segundo capítulo, é efetuada uma pesquisa bibliográfica sobre a construção em terra. Neste, é apresentada a história da construção em terra, assim como, a sua distribuição no mundo e em particular em Portugal. Foram também descritas as técnicas construtivas mais utilizadas referindo as suas vantagens e inconvenientes e os diferentes métodos de estabilização da construção em terra.

No terceiro capítulo é abordada a técnica de construção em terra em BTC de forma detalhada, onde são referidos quais os tipos e dimensões dos mesmos, quais as vantagens e inconvenientes, o seu processo de fabrico e seus equipamentos, assim como as composições típicas do solo desta técnica construtiva.

No quarto capítulo é feita uma introdução aos PCM. Começa-se por integrar o PCM no mercado global e principalmente na construção. Posteriormente, são abordados temas referentes aos tipos de materiais de mudança de fase e quais os métodos de incorporação que existem atualmente.

No quinto capítulo é abordado todo o procedimento prático executado para a elaboração da dissertação. Começa-se pela caracterização do solo efetuada por diferentes ensaios laboratoriais, identifica-se o PCM e ligante hidráulico utilizados e procede-se ao dimensionamento das misturas para posteriormente se passar à produção e cura dos BTC's. Durante a fase de produção elaborou-se uma metodologia de incorporação de PCM nos BTC. Seguidamente, apresentam-se os diversos ensaios efetuados, em que estes incluem a metodologia de ensaio, identificação dos equipamentos e provetes utilizados, resultados e conclusões.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização da presente dissertação assim como as perspetivas futuras relacionadas com o tema estudado.

Por ultimo, no sétimo e oitavo capítulos são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para a elaboração da dissertação e os anexos referenciados ao longo do trabalho.

2 A Construção em Terra

Neste capítulo procede-se a uma análise do estado dos conhecimentos atual na área da construção em terra.

2.1 Conceito e origens

Desde sempre que o Homem foi conseguindo vencer as barreiras criadas pela natureza, encontrando soluções e desenvolvendo técnicas para a construção de abrigos. Os materiais utilizados, as técnicas desenvolvidas e os conhecimentos envolvidos são consequência natural da sociedade de cada época.

Desde há milhares de anos que a terra é utilizada como material construtivo em várias civilizações por todo o mundo. Na Índia estima-se que há cerca de 80 milhões de habitações em terra, o que equivale a 30% do número de habitações, enquanto na China esse número ronda os 100 milhões. Na França 15% dos edifícios rurais são construídos em terra batida [1], enquanto que no Peru as casas construídas em terra representam 40% do número total de habitações [2].

Estima-se que cerca de um terço da população mundial, aproximadamente três biliões de pessoas vive em construções feitas à base de terra [1], e este número pode ascender aos 50% quando considerados apenas os países em desenvolvimento [3]. Em bibliografia mais recente os números são mais expressivos, referindo que cerca de metade da população mundial vive em casas construídas com terra [4].

A terra é largamente utilizada em inúmeras partes do mundo, estando em geral, mas nem sempre, diretamente relacionada com a escassez de recursos financeiros das populações como na América Latina, África, o subcontinente Indiano e outras partes da Ásia, o Medio Oriente e o Sul da Europa [2], como mostra a Figura 2.1.

Desde a antiguidade que a terra é utilizada como material de construção devido à sua abundância e fácil obtenção. Não é consensual a data de início da construção em terra, existindo diversos autores que apontam épocas diferentes para as primeiras construções. Segundo Gernot Minke esta construção já existe há mais de 9000 anos [3]. Susan Pollock refere que a utilização da terra remonta os anos 5000 a 4000 a.C., por outro lado Bjorn Berge refere que nos anos 7500 a.C. já se utilizava a terra para construção [5] e Hugo Houben e Humbert Guillaud mencionam que o solo utiliza-se há cerca de 10000 anos [6]



Figura 2.1: Construção em terra a nível mundial [2]

São inúmeros os casos de construções em terra, que executadas há alguns milhares de anos atrás conseguiram chegar ao séc. XXI, como a Grande Muralha da China, a Cidade de Shibam no Iémen, a Mesquita de Djenné no Mali, a Pirâmide do Sol no México, entre outras construções.

A Grande Muralha da China, exibida na Figura 2.2, apresenta troços construídos em taipa, há aproximadamente 3000 anos atrás. Importa também referir que muitos troços que inicialmente foram construídos em taipa só mais tarde foram revestidos com alvenaria de pedra [5].



Figura 2.2: Troço da Grande Muralha da China [5] [7]

A Cidade de Shibam (Figura 2.3), situada no Iémen é ainda habitável com cerca de 7 mil habitantes, sendo a maioria dos edifícios construídos em terra, com as paredes exteriores em adobe que vão diminuindo a sua espessura com a altura de modo a atenuar o peso do edifício. Estas construções datadas do século XVI chegam a atingir os 40 metros com cerca de 11 andares [8].



Figura 2.3: Cidade de Shibam, Iémen [8]

Mesquita de Djenné no Mali foi declarada como património mundial pela UNESCO em 1988 [9], e é considerada uma das construções mais icónicas do continente Africano, reconstruída em adobe e revestida com um reboco de terra no ano de 1906. A mesquita tem cerca de 5600 m² e a torre principal tem 16 metros de altura [10], como mostra a Figura 2.4:



Figura 2.4: Mesquita de Djenné, Mali [9] [11]

No México, a Pirâmide do Sol (Figura 2.5) é constituída por um núcleo central de cerca de 2 milhões de toneladas de terra compactada [12] e revestida com pedras e cascalho. Esta pirâmide com cerca de 65 metros de altura é considerada a terceira maior do mundo e a sua construção remonta o século II [13].



Figura 2.5: Pirâmide do Sol, México [13]

Em Portugal a construção em terra foi bastante abundante no passado, pois atualmente pode observar-se em quase todo o país vários edifícios antigos, dos quais ilustram diversas técnicas tradicionais de construção em terra (adobe, taipa e tabique). Não há uma data ao certo do início da construção, sendo que alguns autores afirmam que surgiu aproximadamente no ano 5000 a. C. [10], outros autores referem que começou por diferentes civilizações em distintos anos, como a Fenícia (1200 a.C. - 539 a.C.), Cartaginesa (700 a.C. - 146 a.C.) e o Império Romano (27 a.C. - 476 d.C.) [14].

De Norte a Sul do país são vários os exemplos de construção em terra, como por exemplo os Castelos de Paderne (Figura 2.6) e Silves (Figura 2.7) em que as suas construções remontam os séculos XI [15] e IV [16], respetivamente, e usam a taipa como técnica construtiva.



Figura 2.6: Castelo de Paderne [15]



Figura 2.7: Castelo de Silves [16]

Nos últimos 15 anos a construção em terra está a retomar, sobretudo no Sul de Portugal como forma de desenvolver a imagem arquitetónica e turística do Alentejo e Algarve. O centro de monitorização da ETAR de Évora construído em 2010 e a adega da Herdade do Rocim em Beja edificada em 2007 são exemplos de construção em taipa [17], como mostra a Figura 2.8.

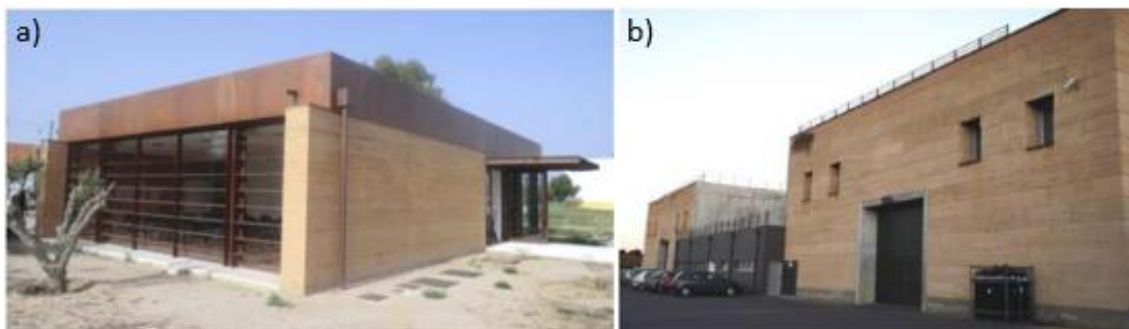


Figura 2.8: Construção em terra: a) ETAR em Évora; b) adega em Beja [17]

O património de construção em terra em Portugal é dos mais ricos da Europa. As técnicas utilizadas são variadas e adaptadas de acordo com o tipo de terreno existente, a herança cultural de povos, o clima e o ambiente essencialmente rural [18]. A Figura 2.9 mostra como estas técnicas construtivas variam consoante a localização geográfica.

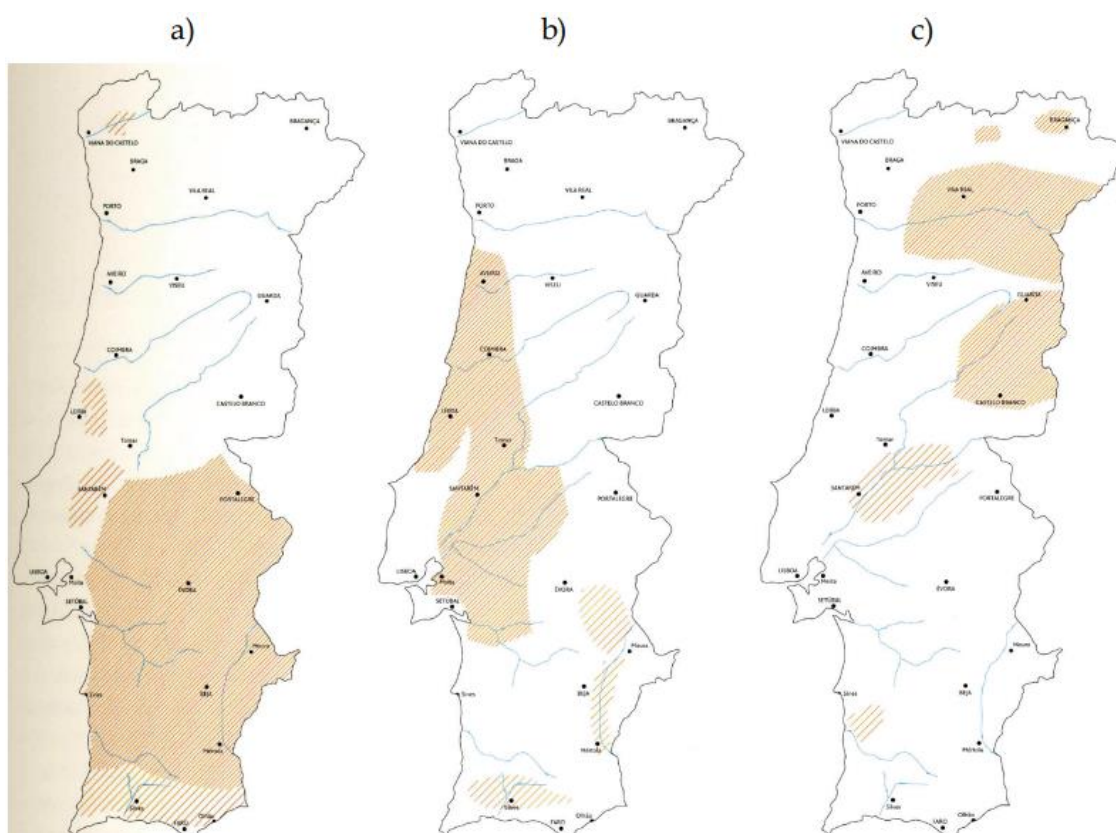


Figura 2.9: Principais técnicas construtivas usadas em Portugal Continental: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique [5]

Em análise à Figura 2.9, pode-se concluir que a maioria das construções em terra distribuem-se pelo Centro e Sul do território, devido ao clima da região ou à escassez de pedra ou ao custo elevado da pedra nesses locais.

A taipa é quase exclusiva do Centro e Sul do país devido ao domínio Islâmico entre os séculos VII e XIII, na construção de fortes militares [10] e também pelo facto desta técnica construtiva necessitar de pouca água, logo esta técnica encontra-se com mais frequência onde esta não abunda [5].

A predominância do adobe no litoral centro do país deve-se a esta técnica necessitar de mais água que as restantes [5] e às características gerais dos materiais naturais existentes no local, juntando às terras argilosas, areias grossas, cal e a incorporação de fibras vegetais. Autores afirmam que 40% do edificado existente no distrito de Aveiro é construído em adobe [10].

A construção tradicional do Norte de Portugal envolvia tipicamente a pedra, utilizando-se o tabique nas paredes divisórias das habitações [10].

2.2 Materiais

2.2.1 O solo

Os terrenos existentes na superfície da crosta terrestre são constituídos por solos e rochas. O solo é considerado um meio particulado, natural e trifásico (sólido, líquido e gasoso) [10]. A fase sólida do solo resulta dos constituintes orgânicos provenientes dos organismos animais e vegetais, e dos constituintes minerais resultantes da desagregação das rochas. A fase líquida resulta da água da chuva e da humidade, enquanto a fase gasosa corresponde ao ar que ocupa os vazios entre as partículas sólidas e líquidas e dos gases formados pela decomposição de elementos orgânicos [19].

O solo é constituído por matéria orgânica e por matéria mineral. A matéria orgânica está presente nas camadas superficiais do solo, até uma profundidade geralmente não superior a 1 metro. Esta é proveniente de organismos animais ou vegetais, vivos ou em processo de decomposição, e denomina-se de húmus. Genericamente, a matéria orgânica não é desejável do ponto de vista da construção, pois absorve muita água e é muito compressível, devendo ser excluída da mistura a utilizar.

A matéria mineral perfaz a maior percentagem do solo, e é proveniente da desintegração de rochas, em fenómenos designados por intemperismo e resultantes da ação de agentes físicos

(quando a rocha se fragmenta mecanicamente), químicos (quando os minerais são alterados ou dissolvidos por reações químicas) e biológicos (quando a rocha adultera pela ação direta de organismos vivos). Os solos podem ser classificados como residuais e sedimentares. Enquanto os solos residuais permanecem no local da rocha que lhes deu origem, os solos sedimentares sofrem transporte desde o local de origem até ao depósito onde se encontram. Esse transporte pode ser efetuado pelo vento, água no estado líquido ou no estado sólido, formando os glaciares, e mesmo através da ação da gravidade. As partículas do solo podem ser classificadas de acordo com as suas dimensões. Por ordem crescente das dimensões temos as argilas, os siltes, as areias e os cascalhos. Em geral, o material constituinte das partículas de maiores dimensões (siltes, areias e cascalhos) são quimicamente estáveis enquanto que a argila apresenta uma composição mineralógica que as torna quimicamente muito ativas. As areias e os cascalhos não podem ser utilizados como matéria-prima na construção com terra sem que se adicione qualquer tipo de ligante, pois funcionam como material de enchimento [20].

A argila, apesar de ser um elemento instável na presença de diferentes teores de humidade, apresenta excelentes propriedades como ligante. Por este motivo a construção em terra desde que bem doseada e compactada pode apresentar bons resultados de estabilidade. Os autores Houben e Guillaud mencionam que a terra com cerca de 10% de argila é suficiente para garantir as propriedades de coesão e plasticidade necessárias para a construção em terra. Mas por outro lado citam que com uma percentagem de 40% a 50% de argila, a terra obtém as propriedades de uma argila, tornando-se muito instável devido à grande capacidade de absorção de água e consequentemente a alteração volumétrica [6].

2.2.2 Teor de água

A água tem influência direta na trabalhabilidade, homogeneidade, coesão, absorção, porosidade e durabilidade [21]. Esta desempenha um papel essencial para que seja possível construir com a matéria-prima terra. Em grandes quantidades é prejudicial, mas a presença da quantidade certa é essencial para garantir uma mistura adequada na construção com terra. Esta reforça a coesão através do aumento da interação entre as partículas de argila. A coesão deve-se às forças que desenvolvem um forte vínculo entre os filmes de água adsorvida e as placas de argila [20].

2.2.3 Métodos de estabilização do solo

Visto que o solo é um material natural, complexo e heterogéneo nem sempre apresenta as características desejadas para o seu uso na construção. Posto isto, é necessário tomar medidas

para obter uma solução, podendo optar-se por três distintas: a aceitação do solo ajustando o projeto de acordo com as limitações do mesmo; adotar outro solo com melhores características; ou alterar as propriedades do solo com o objetivo de criar um solo adequado. Esta última solução é a mais usual e denomina-se de estabilização do solo [22].

A estabilização tem como objetivo aumentar o desempenho físico, mecânico e de durabilidade. Em geral, melhora as propriedades do solo reduzindo o volume de vazios e melhora a coesão entre as partículas do solo. Assim, promovem nos solos a diminuição da porosidade, a redução da permeabilidade e o aumento da resistência mecânica. Deste modo, há uma redução na sensibilidade à água e erosão superficial, minimização da fissuração e aumento da coesão [23].

No entanto, não é recomendável adotar sempre o mesmo método de estabilização para todos os solos, uma vez que cada solo apresenta as suas características, ou seja, é importante conhecer bem cada tipo de solo antes da estabilização [24].

Existem três procedimentos de estabilização do solo, envolvendo métodos físicos, mecânicos e químicos.

2.2.3.1 Estabilização física

A alteração da textura do solo é realizada através da mistura controlada de partículas de diferentes composições e granulometrias, procedendo-se à correção de um solo, segundo o resultado obtido na curva granulométrica [19], onde por exemplo, no caso de um solo ser muito argiloso e plástico poderá corrigir-se o mesmo, adicionando-se material mais arenoso. No caso de existir um excesso de partículas finas, são adicionadas partículas mais grossas, que irão conferir melhores características mecânicas ao solo. Quando o solo utilizado é mais grosseiro, a correção é feita por remoção das partículas mais grosseiras, através da peneiração, ou pela adição de material mais fino [25].

2.2.3.2 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica procura melhorar as características do solo, através da melhor organização das suas partículas constituintes, com o principal objetivo de diminuir o número de vazios existentes neste. Esta estabilização é realizada por compressão, possibilitando assim a alteração da porosidade, da permeabilidade e da compressibilidade de um solo [10]. Este tipo de estabilização é conseguida essencialmente através de 3 métodos:

- Compressão estática cuja força é exercida por uma prensa mecânica ou hidráulica;

- Compressão dinâmica por impacto cuja força é exercida por impacto criando uma onda de choque e de pressão que coloca as partículas em movimento;
- Compressão dinâmica por vibração em que se utilizam aparelhos de vibração que exercem uma série de impactos rápidos sobre o solo. O movimento impresso às partículas elimina temporariamente a fricção interna e permite a reorganização das partículas [19].

2.2.3.3 Estabilização química

A fim de diminuir a sensibilidade à água, as altas taxas de contração e expansão e a baixa resistência à abrasão, recorre-se ao melhoramento das propriedades do solo pela adição de ligantes, como por exemplo, cimentos, cal, betumes, produtos químicos (resinas sintéticas) ou produtos naturais, que alteram as características do mesmo, e aumentam a resistência mecânica e diminuem a vulnerabilidade à água, apresentando no entanto algumas desvantagens, como o aumento dos custos na produção e a toxicidade dos materiais. A quantidade das adições deve ser controlada, de maneira a evitar a subestabilização, ou sobrestabilização [26].

De seguida apresentam-se alguns ligantes e as suas respetivas melhorias/alterações que estes provocam no solo:

- Cimento: agrupa as partículas e torna a argila mais estável;
- Cal: faz a dissolução dos materiais argilosos;
- Betume: melhora a ligação dos solos com fraca coesão e aumenta a resistência da terra à ação da água;
- Resinas sintéticas: a sua utilização permite obter as melhorias referidas com a utilização do cimento, cal e betume, mas com a desvantagem de ser um produto tóxico e de elevado custo.

2.3 Técnicas Construtivas

As técnicas construtivas para a construção em terra são inúmeras. A forma como esta é aplicada, trabalhada e conjugada com outros materiais diverge significativamente consoante a localização geográfica, cultura, geologia dos terrenos de implantação, qualidade do solo, condições climáticas e conhecimento empírico [14].

Houben e Guillaud identificaram 18 técnicas de construção em terra, que podem ser divididas em 3 grupos distintos: a terra usada como construção monolítica, estrutura em alvenaria e estrutura de suporte com enchimento de terra [27], como se pode observar na Figura 2.10.

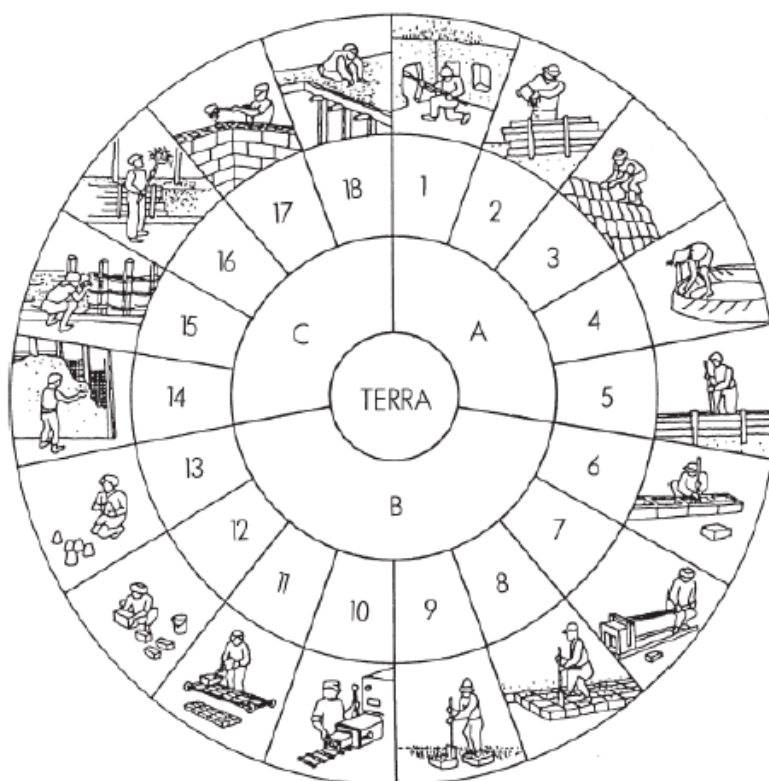


Figura 2.10: Diagrama estabelecido pelo CRATerre¹ das diferentes técnicas construtivas [27]

O diagrama anterior pode ser traduzido na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Técnicas de construção em terra [27]

A - Estrutura monolítica	B - Estrutura em alvenaria	C - Estrutura de suporte com enchimento de terra
1 - Terra escavada	6 - Blocos apilados	14 - Terra de recobrimento
2 - Terra plástica	7 - Blocos de terra comprimida	15 - Terra sobre engradado
3 - Terra empilhada	8 - Blocos cortados	16 - Terra palhada
4 - Terra moldada	9 - Torrões de terra	17 - Terra de enchimento
5 - Taipa	10 - Terra extrudida	18 - Terra de cobertura
	11 - Adobe mecânico	
	12 - Adobe manual	
	13 - Adobe moldado	

Entre todas as técnicas apresentadas, as mais utilizadas em Portugal são a taipa, o tabique e o adobe.

¹ O CRATerre é um laboratório de investigação em arquitetura de terra fundado em 1979, e é considerado uma autoridade internacional no que toca à temática da construção em terra [83]

2.3.1 Taipa

A taipa é a prática de construção em terra mais conhecida em Portugal. Esta técnica constitui uma estrutura monolítica, que resulta do apiloamento “*in situ*” da terra. Diz o ditado que “a terra deve ser transportada por um coxo e batida por um louco”, ou seja, por um lado deve ser dado tempo de descanso à terra desde que é removida do local até ser aplicada na construção, e por outro lado, deve ser compactada de forma enérgica ao ser aplicada na construção [28]. A sua execução consiste na compactação da terra devidamente humedecida dentro de uma cofragem de madeira (Figura 2.11). A terra é colocada no interior da cofragem em camadas entre 10 a 20 cm. Para compactar as camadas pode-se recorrer a diversas ferramentas, podendo ser realizada manualmente com o recurso de um pilão ou com recurso a equipamentos mecânicos, como o compactador elétrico ou o compactador pneumático, como se pode ver na Figura 2.12. A compactação é efetuada até atingir a altura pretendida sendo depois retirada a cofragem, concluindo-se a construção das paredes [12].



Figura 2.11: Construção em taipa: a) cofragem de madeira; b) compactação tradicional [12]

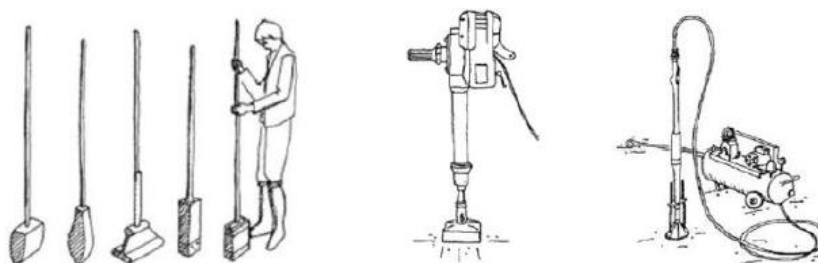


Figura 2.12: Diferentes métodos de compactação [24]

A taipa é propícia para climas quentes e secos, com pouca precipitação. É uma técnica de fácil execução e apresenta uma textura lisa, sendo fácil a adaptação à paisagem. Com esta prática é possível obter paredes com boa capacidade resistente e inércia térmica [28]. No entanto,

apresenta alguns inconvenientes, uma fraca estabilidade lateral e pouca resistência à água. Foi uma técnica muito utilizada no passado, mas também é muito utilizada na arquitetura moderna [12], como se pode ver na Figura 2.13.



Figura 2.13: Construção em taipa: a) novo edifício da empresa Ricola, Suíça; b) piscina coberta com paredes exteriores em taipa à vista, Espanha [10]; c) habitação moderna em taipa, Beja [12]

Esta técnica necessita de algum tempo para ser realizada, contudo, recentemente desenvolveu-se a taipa mecanizada, através da aplicação de cofragens metálicas deslizantes e sistemas mecânicos de compactação de terra (Figura 2.14). Para este processo, recorre-se quase sempre a adições de cimento ou cal à terra prensada [5].

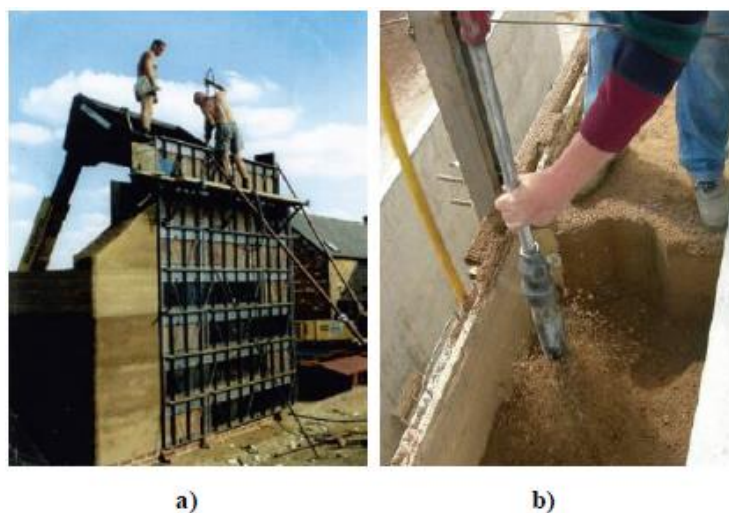


Figura 2.14: Construção em taipa: a) cofragens metálicas; b) compactação com pilões mecanizados [12]

2.3.2 Tabique

O tabique é uma técnica utilizada na maioria das vezes em paredes divisórias não resistentes e tetos (Figura 2.15). A sua execução consiste numa combinação de terra com uma estrutura de suporte, geralmente em madeira. O processo construtivo é misto, pois a madeira tem a capacidade de suporte e a terra de enchimento. Este sistema consiste em dispor tábuas de madeira ordenadas verticalmente, às quais são pregadas num segundo nível as ripas de madeira horizontais (fasquio), para de seguida serem revestidas a uma argamassa de terra. Usualmente adiciona-se à terra, palha ou sáculos de espigas [29].



Figura 2.15: Execução de tabique em paredes [28] e tetos [30]

As construções em tabique possuem geralmente um piso térreo em alvenaria de pedra e os restantes pisos em tabique, uma vez que possuem um baixo peso. Na Figura 2.16 são apresentados exemplos deste tipo de construção [24].



Figura 2.16: Habitações antigas em tabique [24]

2.3.3 Adobe

O adobe é uma técnica de construção tradicional muito antiga. A sua construção requer o uso de um solo plástico e argiloso, por isso é sobretudo utilizada em locais onde é possível encontrar água. A utilização de solo argiloso leva ao aparecimento de fissuras quando o adobe seca devido

à retração do material. Por isso, é costume reforçar o adobe misturando palha ou outras fibras vegetais para evitar este comportamento [12].

O fabrico destes blocos consiste em modelar pequenos blocos à mão ou em molde, normalmente em madeira, sendo desenformados ainda no estado fresco. Após esta fase, o bloco é seco à temperatura ambiente e ao fim da 4ª semana de secagem faz-se o teste de qualidade dos blocos que consiste em verificar se resiste ao peso de um homem. Se não resistir é adicionada mais argila à mistura para aumentar a resistência mecânica após fabrico [28].



Figura 2.17: Desmoldagem dos blocos de adobe [10]

O assentamento dos adobes é realizado com argamassa à base de terra de forma a se obter um melhor comportamento de conexão entre os materiais, uma vez que se mantém o mesmo nível de retração, evitando-se assim o aparecimento de fissuras ou destacamento do material [12].



Figura 2.18: Fases de construção de alvenarias em adobe: a) Elevação das paredes exteriores e interiores; b) Construção até à cota dos vãos; c) Marcação dos vãos; d) Construção até receber os elementos da cobertura [28]

Outra particularidade deste tipo de construção é a versatilidade desta técnica que permite o seu uso, em alvenarias exteriores e interiores, como observado acima, mas também na construção de muros, arcos, abóbadas e cúpulas [10], como se pode verificar na Figura 2.19.



Figura 2.19: Construção em adobe: a) Cúpula e arco [31]; b) abóbada [32]

2.4 Vantagens e inconvenientes da Construção em Terra

A terra, um dos primeiros materiais de construção utilizados pelo Homem foi um material menosprezado ao longo dos anos, principalmente pelos países desenvolvidos onde a construção mais frequente é com betão, aço, blocos e argamassas. Muito provavelmente esta escolha baseia-se no senso comum, no desconhecimento das vantagens da construção em terra e nas desvantagens associadas a esta edificação.

2.4.1 Vantagens

O solo como material de construção apresenta diversas vantagens, quer a nível económico, energético, ecológico, social e cultural.

Os principais benefícios são: a redução do custo de construção, pois é um material utilizado no local que não necessita de transporte e não requer mão-de-obra qualificada nem equipamentos de elevado custo; a poluição é bastante reduzida quando comparada a outros materiais, como se pode observar na Tabela 2.2, uma vez que é um material utilizado no seu estado natural, totalmente reutilizável e não tóxico; tem um bom isolamento acústico devido à massa das paredes [24]; é um material com boa permeabilidade ao vapor de água e não combustível, logo permite que as construções em terra possuam elevada resistência ao fogo [14] e tem um excelente desempenho térmico, visto que a terra possui uma porosidade e condutibilidade térmica baixas [17], como mostra a Figura 2.20.

Tabela 2.2: Comparação das emissões de diferentes materiais de construção [33]

Material	Massa volúmica (kg/m ³)	Emissões (CO ₂ /kg)	Emissões (CO ₂ /m ³)
Taipa (sem estabilização)	2200	0.004	9.7
Adobe	1200	0.06	74
Betão armado, betonado <i>in situ</i>	2360	0.14	320
Betão armado, pré-fabricado (2% aço)	2500	0.18	455
Parede de alvenaria em tijolo maciço	1600	0.19	301
Parede de alvenaria em tijolo furado	670	0.14	95

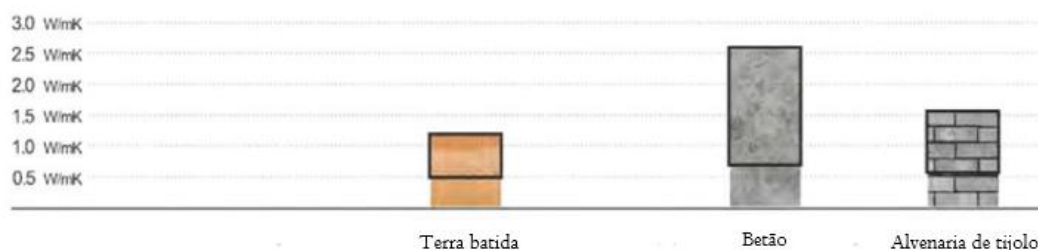


Figura 2.20: Condutibilidade térmica associada à taipa, betão e tijolo, respetivamente [17]

2.4.2 Inconvenientes

Como qualquer material de construção, a terra também apresenta as suas desvantagens, como por exemplo: a baixa resistência mecânica que impossibilita a construção em altura por razões que se prendem com a vulnerabilidade aos sismos; a retração elevada que é consequência da secagem que desidrata a terra e provoca a fendilhação e a diminuição das propriedades mecânicas; a matéria-prima a utilizar geralmente é heterogénea [28]; pouco aceite na sociedade e considerado por muitos um material de construção inferior ou de segunda escolha [14]; baixa durabilidade quando em contacto com a água sendo necessária a manutenção frequente; baixa resistência à flexão (Figura 2.21) e à tração quando comparado com outros materiais e a falta de regulamentação adequada para a construção [24].

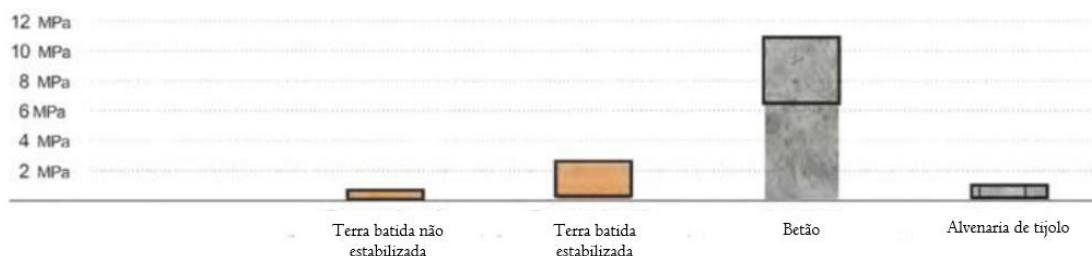


Figura 2.21: Resistência à flexão associada à taipa não estabilizada, taipa estabilizada, betão, e tijolo [17]

2.5 Análise do Solo

A caracterização de um determinado solo é realizada através de ensaios que permitem quantificar diversos tipos de propriedades. Esses ensaios podem ser subdivididos, em ensaios expeditos a realizar a nível de campo com um nível de fiabilidade pouco elevado e em ensaios de laboratório com um nível de fiabilidade alto.

Os ensaios expeditos permitem para determinadas situações, algumas conclusões iniciais sobre que tipo de solo existe disponível no local, dispensando por isso a realização de ensaios de laboratório, e que são mais dispendiosos. Os ensaios expeditos são: observação da cor, teste do cheiro, teste do tato, teste do brilho, teste da aderência, teste da sedimentação, teste visual por peneiração expedita, teste de retenção de água e teste de resistência à secagem.

Os ensaios de laboratório são realizados segundo procedimentos normalizados, o que leva a resultados mais rigorosos e mais fiáveis. Estes ensaios são a determinação do teor de água, a matéria orgânica, a análise granulométrica, os limites de consistência, o ensaio de compactação proctor e o ensaio de resistência à compressão simples [34].

2.6 Regulamentação

A falta de regulamentação relacionada com a construção em terra em Portugal, bem como o declínio na sua utilização no século XX devido à preferência da construção em tijolo de barro cozido, levaram a que durante estes anos se continuasse a utilizar métodos de produção baseados no saber empírico adquirido ao longo do tempo, em vez de se investir na evolução das mesmas, segundo o conhecimento científico atual [35].

De facto a construção em Portugal é desprovida de qualquer regulamentação ou código, apenas existe um documento de carácter de recomendação técnica elaborado no LNEC pelos engenheiros Ruy Gomes e José Folque [20]. No entanto são vários os países que possuem regulamentação no âmbito da construção em terra, resolvendo problemas relacionados com a falta de documentos normativos que garantem a qualidade e a segurança da construção. Segundo Horst Schroeder existem documentos normativos na Alemanha, Suíça, Espanha, Austrália, Brasil, Colômbia, França, Índia, Quênia, Quirguistão, Nepal, Nova Zelândia, Nigéria, Peru, Sri Lanka, EUA (Novo México e Califórnia), Tunísia e no Zimbabué [36].

3 Blocos de Terra Comprimida

Os Blocos de Terra Comprimida (BTC) são uma nova técnica de construção, desenvolvida nos tempos modernos, que combina as técnicas ancestrais do adobe e da taipa, tão comuns em Portugal. Em vez de serem moldados ou compactados à mão, os blocos são formados comprimindo uma certa quantidade de terra ligeiramente humedecida, dentro de uma prensa mecânica de aço. Esta compressão torna possível extrair o ar presente na terra, a fim de impermeabilizar o bloco e aumentar a sua resistência. Comparado com os adobes e outros blocos moldados à mão, o BTC é completamente regular no tamanho e na forma, e muito mais denso [37].



Figura 3.1: Blocos de adobe [38] vs blocos de terra comprimida [39]

Estes blocos são conhecidos como tijolo ecológico por serem uma alternativa sustentável em comparação aos outros métodos construtivos [40].

3.1 Enquadramento

As primeiras tentativas de BTC foram realizadas nos inícios do século XIX, em França. O arquiteto François Cointeraux fabricou pequenos BTC em que usava os pés para comprimir a terra húmida dentro de pequenos moldes de madeira. Mais tarde desenvolveu a “Crécise”, uma prensa manual derivada de uma prensa de vinhos, na qual usou para fabricar os BTC usados para construir a cidade de La Roche-Sur-Yon.

Anos mais tarde, a partir da década de 50 do século XX, mais precisamente em 1952 o engenheiro Colombiano Raúl Ramirez inventou uma nova prensa manual, a “CinvaRam” (Figura 3.2) [37]. Com esta prensa foi possível obter blocos de terra com forma e tamanhos mais regulares, e aumentar as resistências mecânicas como a resistência à compressão, ao desgaste e à erosão, face aos adobes tradicionais [38].

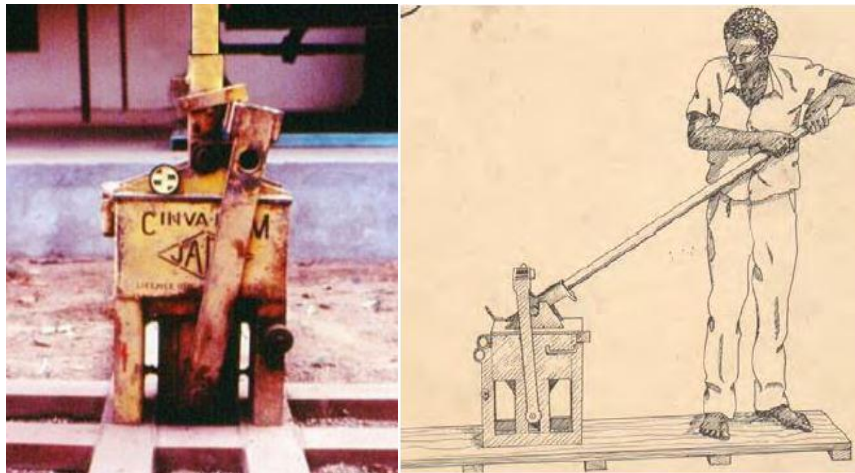


Figura 3.2: Prensa original CinvaRam [37] [14]

Em Portugal, a construção em BTC foi pouco difundida visto que a sua reinvenção nos anos 50, na Colômbia, coincidiu com o abandono das técnicas de construção em terra em Portugal [10]. No entanto, atualmente esta técnica construtiva tem vindo a aumentar devido à elevada sustentabilidade que lhe está associada com a vantagem adicional de apresentar desempenhos superiores às alvenarias de adobe [41].

A Figura 3.3 apresenta uma habitação situada no Alentejo em que as alvenarias, quer exteriores, quer interiores são em BTC sólidos [5].



Figura 3.3: Construção de alvenarias com recurso a BTC, Alentejo [5]

3.2 Características dos BTC

Os BTC podem ter funções estruturais ou ser utilizados como material de enchimento. Têm um acabamento liso devido à moldagem o que lhes permite serem aplicados em obra sem necessidade de revestimento, traduzindo-se numa vantagem económica e ambiental. Devido à compactação da terra durante a moldagem, os blocos frescos (logo após moldagem) apresentam resistência suficiente para serem transportados e empilhados para a fase de cura (Figura 3.4), com cuidado pois as arestas dos blocos frescos são facilmente danificadas. Esta característica permite uma ocupação mais eficaz do espaço de armazenamento dos blocos em relação aos blocos de adobe [10].



Figura 3.4: Cura dos BTC em ambiente húmido [42]

As dimensões dos BTC dependem dos moldes da prensa utilizada, sendo que algumas prensas permitem a produção de vários blocos (mais pequenos) em simultâneo. As dimensões produzidas variam muito de país para país, contudo as mais correntes são: $250 \times 140 \times 90 \text{ mm}^3$ a $300 \times 150 \times 120 \text{ mm}^3$.

No que respeita à forma dos BTC, esta pode variar dependendo do molde a utilizar na prensa, o que permite a produção de diferentes tipos de blocos. Segundo Rigassi existem cinco tipos de famílias dos BTC. Estas designam-se por blocos sólidos, blocos ocos, blocos perfurados, blocos interligados e blocos parasísmicos [23].

3.2.1 Blocos sólidos

Os blocos sólidos ou blocos maciços (Figura 3.5) geralmente têm a forma prismática podendo ser cubos, paralelepípedos, prismas, etc. A sua utilização é muito diversificada. [23].

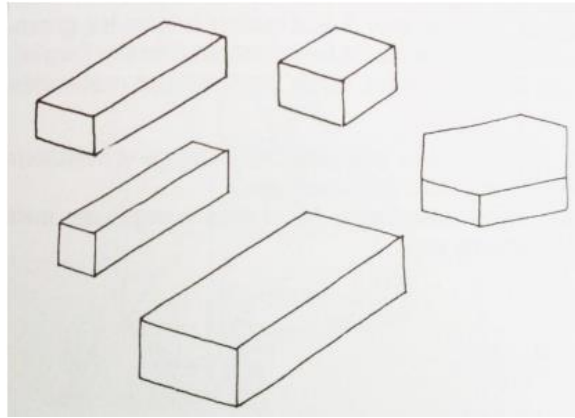


Figura 3.5: Blocos sólidos [43]

3.2.2 Blocos ocos

Os blocos ocos (Figura 3.6), como o próprio nome indica, possuem vazios na sua constituição que representam um total de 5% a 30% do bloco. Neste último caso este valor é alcançado com técnicas e moldes mais sofisticados. Os vazios têm como objetivo a redução do peso do bloco e melhorar a aderência das argamassas [23].

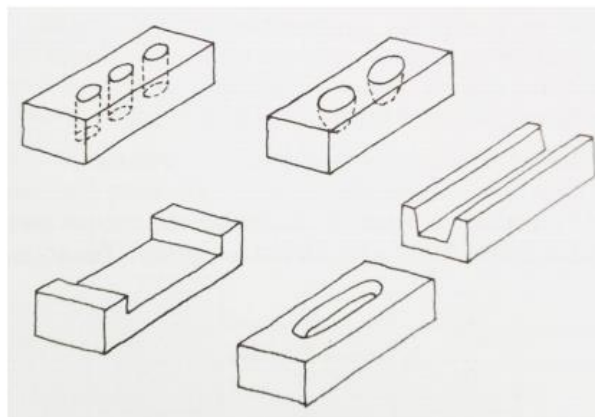


Figura 3.6: Blocos ocos [43]

3.2.3 Blocos perfurados

Os blocos perfurados (Figura 3.7) têm maior número de vazios quando comparados com os blocos ocos, e por esse motivo apresentam maior leveza. Estes blocos são aconselhados para zonas sísmicas (alvenarias reforçadas) pois exigem a utilização de moldes mais sofisticados e uma maior força de compressão. A sua ligação deve ser feita com auxílio de argamassa [23].

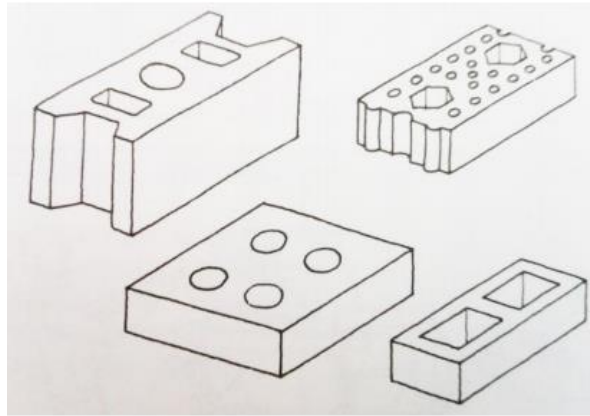


Figura 3.7: Blocos perfurados [43]

3.2.4 Blocos interligados

Os blocos interligados ou de encaixe (Figura 3.8) são usados para alvenarias que não suportam cargas. Estes blocos permitem que o processo construtivo das alvenarias seja em junta seca, ou seja, pode dispensar a utilização da argamassa, pois possuem no seu formato inicial encaixes tipo macho/fêmea, mas requerem moldes mais sofisticados e uma maior força de compactação [23].

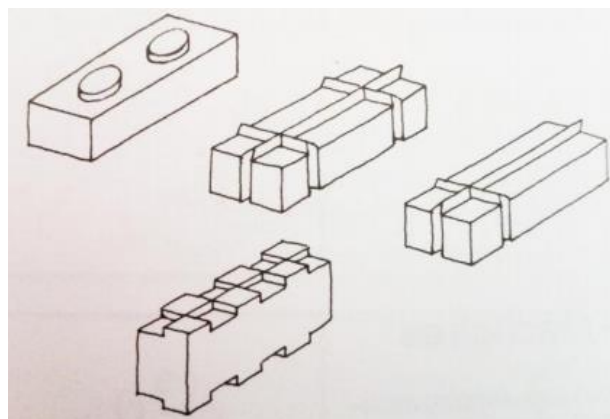


Figura 3.8: Blocos interligados [43]

3.2.5 Blocos parasísmicos

Os blocos parasísmicos (Figura 3.9) apresentam características que melhoram o comportamento do elemento, face a um sismo, e permite uma melhor integração dos sistemas sísmicos estruturais [43].

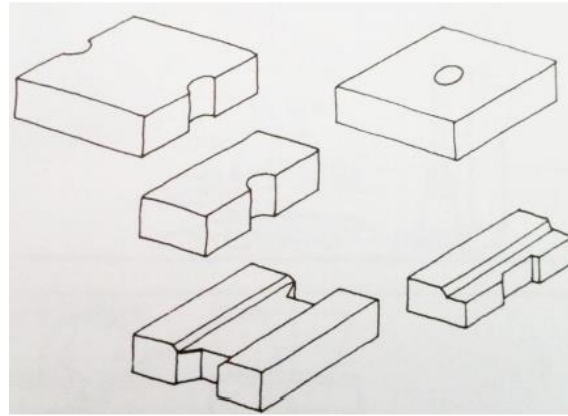


Figura 3.9: Blocos parasísmicos [43]

No caso dos blocos ocos, perfurados e interligados, os seus vazios para além das vantagens referidas acima, também permitem a passagem de reforços através da introdução de armaduras na vertical, e a passagem de instalações elétricas ou hidráulicas, como mostra a Figura 3.10 [38].



Figura 3.10: Detalhes construtivos em BTC [44]

3.3 Benefícios da construção em BTC

Como a maior parte da matéria-prima que constitui o BTC é a terra, as vantagens e desvantagens anteriormente mencionadas são comuns aos BTC, mas importa referir que ainda nesta técnica se enumeram as seguintes:

Quanto às vantagens temos: a rápida execução da construção, nomeadamente se forem utilizados blocos interligados, como se pode visualizar na Figura 3.11 que apresenta um projeto na Índia,

em que a habitação foi construída em apenas 64 horas [5]; a tecnologia a utilizar é simples, de fácil aprendizagem e a mão-de-obra é semiqualeficada [38]; a precisão na compactação com a utilização de prensas, sendo que as hidráulicas são mais precisas e conferem sempre a aplicação da mesma carga nos blocos; a possibilidade de implantação de um controlo de produção para aumentar a qualidade, resistências mecânicas e acabamento final; a mobilidade associada ao equipamento de produção e uma melhor aceitação em relação a fatores culturais e sociais [14].



Figura 3.11: Habitação construída em BTC interligado em 64 horas, Índia [5]

No que respeita às desvantagens é essencial uma correta identificação do solo a utilizar; as equipas de trabalho têm de ter algum conhecimento para a produção [38]; estes blocos são mais pesados do que os blocos de adobe e as dimensões e formatos dos blocos estão limitados aos moldes da prensa disponíveis [10].

3.4 Fabrico

O processo de fabrico do BTC é simples e económico, o que traz grandes vantagens para a população, uma vez que é uma técnica ao alcance de todos [14].

Em geral a composição dos BTC é constituída por argila, areia, água e estabilizadores, podendo ser cimento, cal, ou ambos, como estão representados na Figura 3.12 [40].



Figura 3.12: Composição dos BTC [40]

No que se refere à seleção do solo há que ter em consideração que a correta seleção deste, é o fator que mais pesa na qualidade final de BTC [19].

Posteriormente à seleção do solo segue-se a sua extração. Esta pode ser efetuada com recurso a meios mecânicos ou manuais e deve ser executada a uma profundidade mínima de um metro, de modo a conter o mínimo possível de matéria orgânica.

Após a fase anterior descrita, segue-se a preparação do solo (Figura 3.13), em que numa primeira fase efetua-se a pulverização e de seguida a peneiração. A pulverização tem o intuito de fragmentar as pedras e o cascalho por ação de moagem e dividir os torrões por ação do esmagamento. Esta pode ser feita manualmente (maços e pilões) tornando-se um trabalho árduo e moroso ou pode-se recorrer a pulverizadores mecânicos [23]. Segundo Adam a pulverização manual tem um rendimento médio de 1m^3 por dia por trabalhador, o que é muito reduzido quando comparado com a pulverização mecânica [45]. A peneiração consiste em obter a granulometria pretendida através da eliminação de elementos indesejados na mistura, como por exemplo as partículas de maiores dimensões e a matéria orgânica, sendo que esta última tem influência direta no BTC alterando as suas características e as propriedades físicas e mecânicas [23].

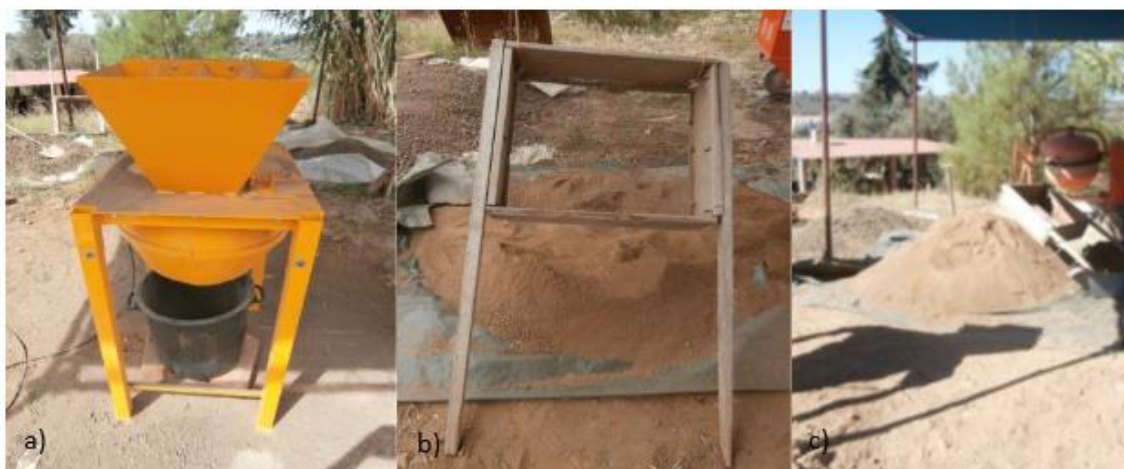


Figura 3.13: Preparação do solo: a) Pulverizador mecânico de pás; b) Peneiro manual; c) Solo após pulverização e peneiração [10]

Ulteriormente, segue-se o doseamento da mistura que consiste em controlar por peso ou volume os diferentes constituintes da mistura. Posto isto segue-se a preparação da mistura, em que esta pode ser dividida em duas partes: a mistura seca e a húmida. Estas misturas podem ser efetuadas manualmente ou com recurso a misturadoras. A mistura seca consiste em envolver homogeneamente o solo, de preferência seco em estufa à temperatura de $100\pm 5^\circ\text{C}$ para que a sua humidade não influencie o teor de água, com o ligante de modo a estabilizar o solo [23], por

adição de cal (no caso de solos excessivamente argilosos) ou de cimento (para solos excessivamente arenosos). Na mistura húmida adiciona-se água lentamente por rega ou por vaporização sob pressão [19]. Importa salientar que, se a água for adicionada muito rapidamente, será difícil misturar as partes seca e molhada [23].

Quando a mistura estiver concluída inicia-se a principal operação do fabrico dos BTC, a moldagem dos blocos (Figura 3.14) com recurso a uma prensa, em que esta pode ser manual ou hidráulica, como é abordado mais à frente no subcapítulo Equipamentos.



Figura 3.14: Moldagem do BTC: a) Colocação da mistura na prensa; b) Bloco moldado [10]

Por fim, a última fase do fabrico dos BTC é a cura/secagem, que é uma fase de extrema importância na garantia de qualidade dos mesmos. Esta não deve ocorrer muito rapidamente, pois isso pode causar fendas por contração. Em blocos estabilizados procede-se a uma cura húmida, em que a presença de água dentro do bloco e temperaturas altas são cruciais para que o estabilizador atinja a sua resistência máxima. Os blocos não só precisam ser protegidos do sol e do vento diretos, mas também devem ser mantidos em um ambiente quente e húmido com a ajuda de plástico absorvente de calor (preto, por exemplo). A duração deste estágio de cura húmida não deve ser inferior a 7 dias, mas de preferência 14. Contudo para uma cura completa são precisos 28 dias. Em blocos não estabilizados a cura é mais simples, pois é seca. Nesta os blocos também devem ser protegidos do sol e do vento diretos, mas não devem ser mantidos em ambiente húmido [23].

Na Figura 3.15 apresentam-se todos os passos do fabrico dos BTC acima descritos.

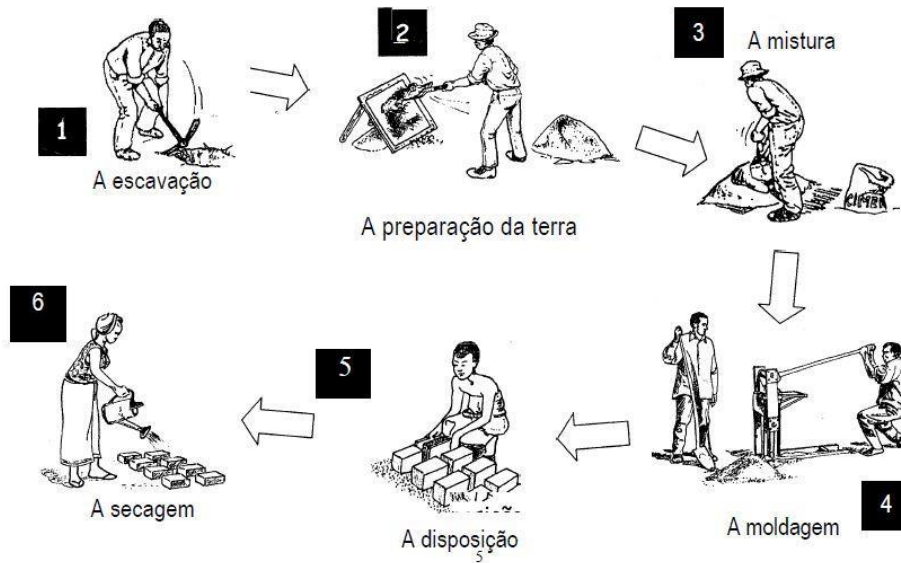


Figura 3.15: Processo de fabrico dos BTC [14]

3.4.1 Equipamentos

Os equipamentos para o fabrico dos BTC denominam-se de prensas. Estas têm evoluído muito ao longo dos anos, e hoje em dia é possível encontrar prensas manuais, bem como prensas hidráulicas [37].

Nos dias de hoje existem diversas prensas manuais (Figura 3.16), de diferentes marcas, baseadas no mecanismo da CinvaRam. Estas prensas aplicam pressões da ordem dos 2MPa, embora existam prensas capazes de aplicar pressões superiores, estas, têm no entanto, o inconveniente de serem bastante pesadas e caras. Estes blocos compactados com recurso a prensas manuais requerem mais mão-de-obra e tempo de fabrico. Tem a vantagem de ser mais económico em termos de consumo energético e a facilidade de transporte para o local da obra, podendo fabricar-se blocos com a terra do próprio terreno [41]. Segundo Rigassi as prensas manuais podem produzir cerca de 300 a 1500 BTC por dia [23].



Figura 3.16: Prensas manuais para o fabrico dos BTC [46]

Os BTC compactados em prensa hidráulica, não requerem força manual, tornando-se num processo de fabrico mais rápido, sobretudo em máquinas que prensam diversos blocos ao mesmo tempo.

Estes blocos apresentam resistências mecânicas substancialmente maiores em relação aos prensados manualmente. Tendo ainda uma maior resistência ao contacto com a água, uma vez que o ajuste entre as partículas é maior, existindo menor quantidade de vazios.

As prensas hidráulicas podem ser fixas ou móveis (Figura 3.17). A mobilidade destas últimas permite a execução dos blocos no local da obra, tal como nas prensas manuais, utilizando a terra do local, com a vantagem de uma maior rapidez de fabrico. Assim, é possível manter uma maior sustentabilidade deste tipo de construção, evitando o transporte desnecessário e economicamente desvantajoso de blocos [41]. Dependendo se as prensas são fixas ou móveis, estas podem produzir cerca de 2000 a 10000 e 1500 a 4000 BTC por dia, respetivamente [23].



Figura 3.17: Prensas hidráulicas para o fabrico dos BTC: a) fixa [41]; b) móvel [17]

3.5 Composições do solo para o fabrico de BTC

A qualidade dos BTC depende do tipo de solo que se utiliza, sendo fundamental efetuar a caracterização do mesmo. A composição mineralógica e a granulometria são dos fatores mais importantes para a elaboração de um BTC com qualidade, onde a quantidade dos diferentes constituintes, tais como argila, silte e material arenoso, influenciam a qualidade do bloco a produzir [43].

Vários autores e normas referentes a BTC definem quais as percentagens mais adequadas, dos diferentes constituintes do solo. A Tabela 3.1 mostra a composição ideal do solo segundo diversos autores e normas.

Tabela 3.1: Composição ideal do solo [43]

	Rigassi	Barbosa	Norma Australiana	Norma Colombiana	Manual do BTC	Norma Espanhola
	(1985)	(2002)	HB 195 (2002)	NTC 5324 (2004)	Uruguai (2006)	UNE 41410 (2008)
Areia	25-80%	50-70%	45-80%	28-82%	40-80%	28-82%
Silte	10-25%	10-20%	10-30%	15-50%	0-20%	15-50%
Argila	8-30%	10-20%	5-25%	10-30%	5-35%	10-30%

Em análise à Tabela 3.1 podemos concluir que as composições ideais dos diversos autores não é muito díspar, e em média a percentagem correspondente à argila é cerca de 10 a 30%, para o silte é igualmente 10 a 30% e para a areia é de 35 a 80%.

No que respeita aos solos estabilizados, o grupo CRATerre estabeleceu a percentagem de cimento para a estabilização de solos para a produção de BTC deve enquadrar-se no intervalo de 6-10%. Já Normando Barbosa refere que esta percentagem deve estar entre 4% a 6% [21].

4 Materiais de Mudança de Fase

4.1 Enquadramento

Os PCM's começaram a ser utilizados no século XIX, na indústria dos transportes, pois eram frequentemente usados para a conservação de mercadorias durante o seu transporte.

A NASA incorporou os PCM's quer nos seus fatos dos astronautas, aproveitando a capacidade destes materiais para manter a temperatura do corpo, face às temperaturas negativas existentes no espaço, quer nas sondas e naves enviadas para o espaço.

Na área da medicina, existem alguns produtos como por exemplo cobertores que têm a capacidade de absorver as temperaturas altas dos doentes febris.

Na indústria têxtil inúmeras empresas têm vindo a desenvolver patentes sobre variadas soluções de aplicação destes materiais no vestuário. Da mesma forma alguns fabricantes de botas de ski também já incorporam este tipo de material [47].

Na construção o elevado crescimento e o aumento dos parâmetros de conforto, levaram à incorporação dos PCM's nos edifícios, pois estes oferecem grandes áreas para o armazenamento e transferência de calor [48].

4.2 Conceito

Os PCM's são materiais de armazenamento de energia, que têm densidades de armazenamento de energia térmica superiores em comparação com os materiais de armazenamento de calor sensíveis, apresentando características únicas no que diz respeito à retenção e posterior libertação de calor a uma temperatura constante, diferenciando-os dos restantes materiais utilizados na construção.

Estes são definidos como substâncias que têm a capacidade de alterar o seu estado físico dentro de um intervalo de temperatura, armazenando o calor latente através da mudança de fase sólida para líquida (reação endotérmica), sendo este calor absorvido, e libertado posteriormente quando as temperaturas descem, passando assim da fase líquida para a fase sólida (reação exotérmica) [49].

Como mostra a Figura 4.1, os PCM's quando se encontram a uma temperatura abaixo do seu ponto de fusão estão no estado sólido. Com o aumento da temperatura, e quando esta atinge o ponto de fusão, o PCM absorve a energia e muda de fase, para o estado líquido. Quando a

temperatura diminui o PCM inverte a mudança de fase e ao solidificar liberta a energia armazenada através de calor latente [50].

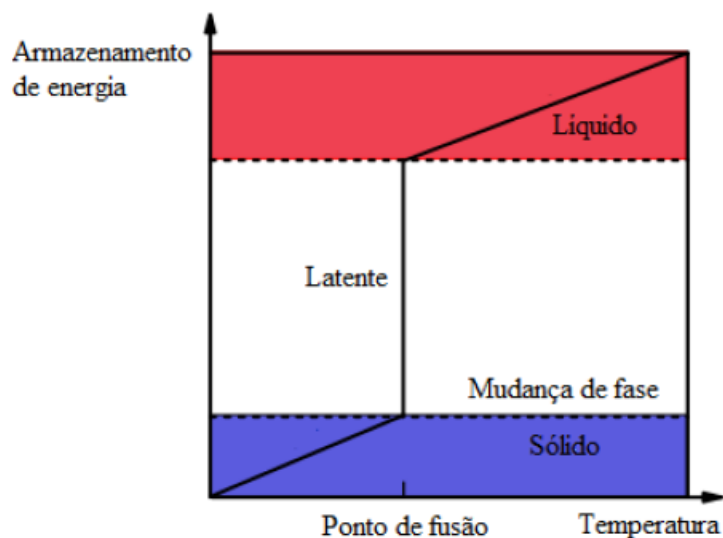


Figura 4.1: Diagrama de mudança de fase sólido-líquido [51]

Os PCM's são caracterizados pela grande capacidade de armazenamento de energia. A Figura 4.2 mostra esta capacidade de armazenamento de energia de alguns materiais, nomeadamente a água, a pedra, a madeira, o plástico e as parafinas. Este último material é um composto dos PCM's, e irá ser abordado mais à frente. Na figura é facilmente perceptível que a parafina tem uma capacidade de armazenamento de energia muito superior à dos outros materiais, cerca de 3 vezes mais do que a água e 6 vezes mais do que a pedra, por exemplo [52].

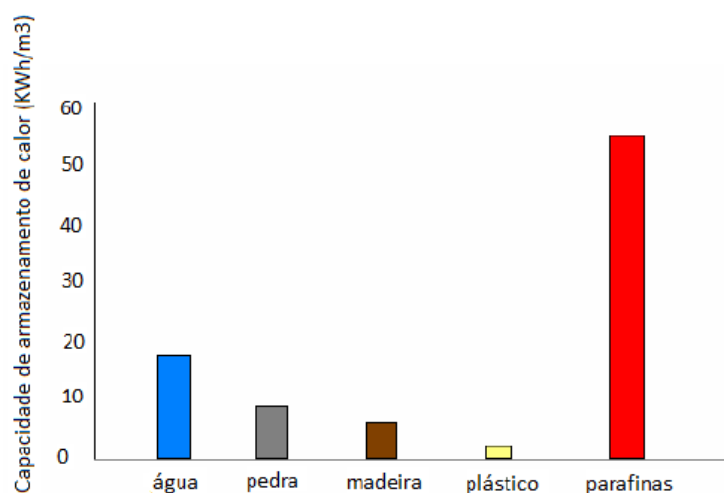


Figura 4.2: Capacidade de armazenamento de energia de alguns materiais [52]

4.3 Classificação dos PCM

Os materiais de mudança de fase são caracterizados segundo as fases de transição, isto é, a mudança entre os estados da matéria. Estas mudanças podem ser entre gás-líquido, sólido-gás,

sólido-líquido e sólido-sólido. Os dois primeiros, gás-líquido, sólido-gás, têm uma utilidade limitada pois necessitam de grandes volumes na aplicação dos respetivos sistemas onde se integram. Os PCM sólido-sólido apresentam valores de entalpia² similares aos sólido-líquido, e como principal vantagem, destaca-se o facto de não haver matéria no estado líquido o que facilita o uso e o manuseamento do material. Por último a transição de sólido-líquido [53] que comparando com as restantes é a melhor para o armazenamento de energia térmica [54]. Esta transição é a que vai ser abordada nesta dissertação.

Os PCM's sólido-líquido podem ser subdivididos em três grupos baseados na sua composição química: os orgânicos, os inorgânicos e por ultimo as misturas eutéticas. Os compostos orgânicos podem ser divididos em parafinas e não parafinas, enquanto os compostos inorgânicos podem ser divididos em hidratos de sal e metais. As misturas eutéticas são uma mistura de dois ou mais componentes, que se fundem e cristalizam formando uma mistura de cristais compostos [55], como ilustra a Figura 4.3.



Figura 4.3: Classificação dos PCM [47]

4.3.1 PCM's orgânicos

Como já foi referido, os PCM orgânicos, podem ser divididos em parafinas e não parafinas (os ácidos gordos). As parafinas são longas cadeias lineares constituídas por carbono e hidrogénio. Estas apresentam uma temperatura de fusão que varia em função do número de átomos de carbono. Os ácidos gordos são PCM orgânicos com características semelhantes às parafinas, com a vantagem de apresentarem mudanças de fase mais nítidas, ou seja, mudam de fase com maior facilidade e perante temperaturas inferiores. Contudo apresentam um custo superior ao das parafinas para além do facto de serem materiais ligeiramente corrosivos [56].

² A energia de entalpia é quantidade de energia que o PCM consegue absorver para libertar posteriormente [84].

Os PCM orgânicos caracterizam-se essencialmente por apresentarem uma fusão congruente, estabilidade térmica e química, pouco ou nenhum sub-arrefecimento e normalmente não são corrosivos para o material que o envolve. Estes compostos não são tóxicos e apresentam elevado calor de fusão. Apresentam desvantagens como a baixa entalpia de mudança de fase, baixa condutibilidade térmica e inflamabilidade [51]. A Tabela 4.1 apresenta alguns PCM's orgânicos e as respetivas características térmicas.

Tabela 4.1: Características térmicas de PCM's orgânicos [53]

PCM	Temperatura de mudança de	Entalpia de mudança de fase
	fase (°C)	(kJ/kg)
Estearato de butilo	19	140
Parafina C ₁₆ - C ₁₈	20-22	152
Parafina C ₁₃ - C ₂₄	22-24	189
Dodecanol	26	200
Tetradecanol	38	205
Parafina C ₁₈ (45 - 55%)	28	244

4.3.2 PCM's inorgânicos

Os PCM's inorgânicos são constituídos por sais hidratados e metálicos. Estes foram os materiais mais estudados no início da investigação dos PCM's.

Estes PCM's caracterizam-se essencialmente por apresentarem uma maior entalpia de mudança de fase. Quando comparados com os PCM's orgânicos, os PCM's inorgânicos apresentam menor estabilidade química, são mais económicos, não são inflamáveis e apresentam boa condutibilidade térmica. Contudo, podem sofrer sub-arrefecimento e decomposição, afetando as suas propriedades de mudança de fase. Alguns destes compostos podem ser corrosivos para a maioria dos metais [56]

A Tabela 4.2 apresenta alguns PCM's inorgânicos e as respetivas características térmicas.

Tabela 4.2: Características térmicas de PCM's inorgânicos [53]

PCM	Temperatura de mudança de fase (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)
Nitrato de manganésio hexahidratado	25,8	125,9
Nitrato de zinco hexahidratado	36,4	147
Cloreto de cálcio hexahidratado	29	190
Flureto de potássio tetra hidratado	18,5	231
Sulfato de sódio deca hidratado	32	251
Nitrato de lítio tri hidratado	30	296

4.3.3 PCM's de misturas eutécticas

As misturas eutécticas como foi referido são uma mistura de dois ou mais componentes de natureza orgânica, inorgânica ou ambas, alcançando-se assim um material de mudança de fase com características melhoradas.

Através de uma adequada mistura destes compostos é possível obter um PCM com um baixo ponto de fusão. Desta forma podem apresentar temperaturas de transição de estado físico mais adequadas às necessidades, do que as temperaturas de mudança de estado físico obtidas pelos compostos individuais da mistura em questão [56].

As misturas eutécticas têm ainda como vantagem a baixa densidade de armazenamento e oferecem um calor latente por unidade de massa elevado. Quanto às desvantagens deste tipo de PCM's estão relacionadas com o seu custo elevado, com a falta de dados sobre as suas propriedades e a sua disponibilidade limitada [51].

A Tabela 4.3 apresenta alguns PCM's de misturas eutécticas e as respetivas características térmicas.

Tabela 4.3: Características térmicas de PCM's de misturas eutécticas [53]

PCM	Temperatura de mudança de fase (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)
Cloreto de cálcio/Cloreto de magnésio	25	127
Nitrato de cálcio/Nitrato de magnésio	30	136
Cloreto de cálcio/brometo de cálcio	14	140
Ácido cáprico-láurico	21	143
Acetato de sódio/Ureia	30	200

4.4 Modos de incorporação dos PCM nos materiais

Os PCM's podem ser utilizados de diferentes maneiras e como tal, têm efeitos diferentes no desempenho da sua função, de armazenamento de calor. Assim, estes podem ser incorporados a diversos materiais através dos processos de impregnação, de imersão, e ainda por encapsulamento [53]. O método mais promissor é o de encapsulamento, mais concretamente o microencapsulamento, como será abordado com pormenor mais à frente [51].

4.4.1 Processo de impregnação

Este modo de aplicação consiste em adicionar o PCM em solução aquosa (estado líquido) ou solução pulverizada (estado sólido), diretamente a uma mistura de gesso, betão ou argamassa, por exemplo.

Este método é simples, é o mais económico comparativamente aos restantes e dispensa o uso de qualquer equipamento que não é normal na fabricação de betão ou outra mistura convencional. Como desvantagem apresenta problemas em termos de incompatibilidade com materiais de uso comum na construção, um claro entrave para ser viável como alternativa [53].

4.4.2 Processo de imersão

Este processo consiste em mergulhar o material num banho de PCM previamente derretido, para este ser absorvido por capilaridade, e de seguida endurecer nos poros do material. Se a temperatura ambiente for inferior à temperatura de mudança de fase, o PCM tem de ser previamente aquecido.

O procedimento de imersão concede ao material uma maior capacidade térmica, mas como inconvenientes é um processo consideravelmente moroso e durante a vida útil do material, ao qual se adicionou o PCM, poderá ocasionar-se situações de vazamento, durante os ciclos térmicos do material absorvido, o que altera a capacidade térmica do produto [53].

4.4.3 Processo de encapsulamento

A incorporação de PCM por encapsulamento, como referido anteriormente, é a técnica que apresenta maior sucesso na sua aplicação em casos reais. Isto porque, uma vez encapsulado evita-se o contacto direto entre o PCM e o material, o que poderia causar problemas de incompatibilidades, problema este que pode ocorrer nos dois métodos anteriormente referidos.

A cápsula que reveste o PCM é constituída por um material polimérico, que faz com que se evitem perdas de PCM nas mudanças de fase. Esta funciona como uma barreira que garante a proteção e o isolamento do PCM, mantendo intactas as propriedades do material.

Como se pode verificar a seguir existem dois tipos de encapsulamento: o macroencapsulamento e o microencapsulamento.

4.4.3.1 Macroencapsulamento

O macroencapsulamento concede diversas melhorias ao PCM, pois permite que o mesmo se mantenha dentro da cápsula nos estados sólido e líquido.

As macrocápsulas podem apresentar diferentes formatos: esféricas, cilíndricas, paralelepípedos, entre outras, como mostra a Figura 4.4.



Figura 4.4: Diferentes tipos de macrocápsulas [56] [57]

Estas cápsulas são de fácil aplicação e fácil manuseamento, ganhando uma clara vantagem em relação aos métodos referidos anteriormente. Mas como desvantagens apresentam uma baixa condutibilidade térmica o que leva a estes tenderem a solidificar-se nas paredes no encapsulamento o que impede a eficácia na transferência de calor, o elevado custo [53] e a dificuldade em adaptar os sistemas de construção à presença deste tipo de PCM [58].

4.4.3.2 Microencapsulamento

As cápsulas utilizadas no microencapsulamento (Figura 4.5) são definidas como pequenas partículas esféricas, e possuem um diâmetro normalmente entre 1 e 1000 μm , mas preferencialmente entre 1 a 60 μm . A designação deste método e do macroencapsulamento provém do tamanho das cápsulas utilizadas em cada processo. No primeiro são utilizadas cápsulas de maior dimensão, no segundo cápsulas de menor dimensão, respetivamente [56].

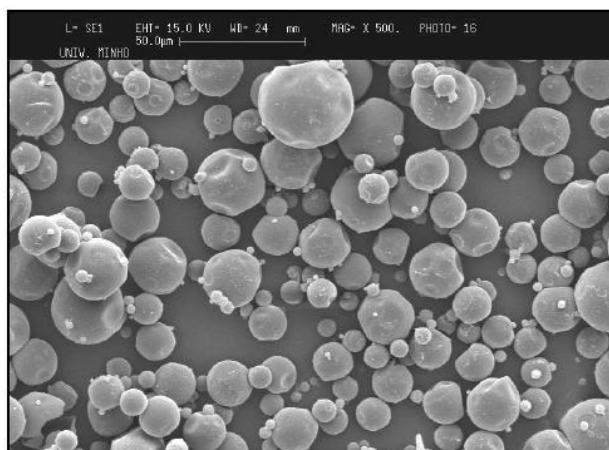


Figura 4.5: Microcápsula de PCM vista ao microscópio (ampliada 500 vezes) [56]

O tipo de morfologia e a constituição da microcápsula tem influência direta nos resultados que se obtêm de cada uma, devido à diferente distribuição do PCM dentro de cada cápsula. Para a produção deste tipo de microcápsulas é necessário usar determinados processos: processo químico, mecânico e físico-químicos, tal qual como representado na Figura 4.6. Acrescenta-se que alguns destes processos podem ser reproduzidos *in situ* [58].

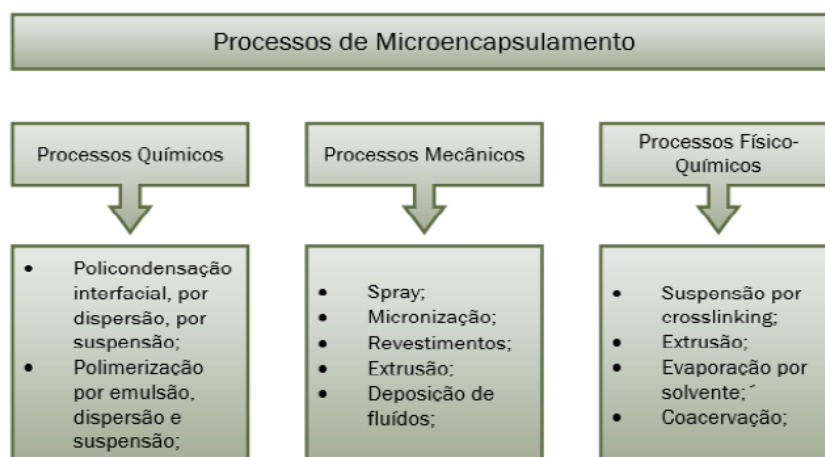


Figura 4.6: Processos de microencapsulamento [58]

Quanto à morfologia das microcápsulas (Figura 4.7), estas podem ser mononucleares, polinucleares e de matriz (esta última é uma solução de PCM em que se adicionaram polímeros) [53].

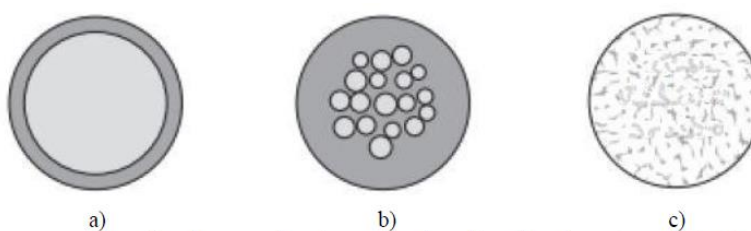


Figura 4.7: Morfologia das microcápsulas: a) mononuclear; b) polinuclear; c) matriz [53]

As vantagens do microencapsulamento são as mesmas descritas para o macroencapsulamento, com as seguintes vantagens adicionais sobre os anteriores: o aumento da razão superfície/volume é crucial, pois melhora a transferência de calor entre a cápsula de PCM e os elementos em contato com esta, melhora a estabilidade cíclica uma vez que a separação de fases é restrita a distâncias microscópicas e adapta-se aos sistemas de construção. Por outro lado, como inconvenientes é o seu elevado custo e o aumento da possibilidade de sobreaquecimento [51].

4.5 Aplicação de PCM's na construção

Na construção, atualmente a população opta por habitações mais sustentáveis de forma a diminuir os níveis de poluição e os gastos energéticos. A incorporação dos PCM's garante um maior conforto térmico no interior das habitações com recurso a materiais sustentáveis, que permitem obter temperaturas equilibradas sem o recurso a equipamentos de climatização [59].

Os PCM's podem ser incluídos na construção de diversas maneiras passando pela incorporação na estrutura de betão armado, recobrimento de tubagens de aquecimento, em sistemas de aquecimento solar, em materiais de construção (telhas, blocos, tijolos, gesso cartonado) e em rebocos.

A energia armazenada pelos PCM's pode ser transmitida de dois modos: por radiação e por convecção. No fenómeno de radiação transmite-se através da incorporação de PCM em paredes, tetos e pavimentos. Por sua vez, no fenómeno de convecção a energia transmite-se através da transferência em sistemas de ventilação e ar condicionado, nos quais se faz passar uma corrente de ar quente ou frio no seio do PCM [49].

Na Figura 4.8 apresenta-se três alvenarias diferentes que possuem a mesma capacidade de armazenamento térmico, mas com espessuras variadas. No primeiro caso é uma alvenaria em tijolo com doze centímetros de espessura, o segundo caso consta uma parede de betão com nove centímetros de espessura, e por último é apresentada uma parede em gesso cartonado com PCM incorporado possuindo apenas centímetro e meio de espessura [50].

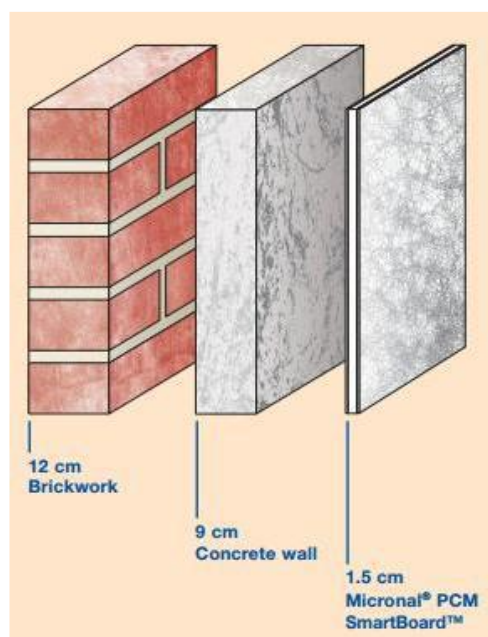


Figura 4.8: Diferentes alvenarias com a mesma capacidade de armazenamento de energia [50]

Em análise à Figura 4.8 pode concluir-se que a incorporação de PCM é bastante benéfica a nível térmico face a outros materiais correntes usados na construção.

Como já estudado anteriormente, o uso dos PCM's na construção é benéfico, pois cria uma temperatura interior amena face à variação da temperatura exterior. Um estudo de simulação realizado pelo autor Paulo Grade, mostra como variam as temperaturas interiores de um edifício com e sem PCM, quer no Inverno quer no Verão. O PCM escolhido tem o ponto de fusão situado nos 21 °C [47].

➤ No Inverno

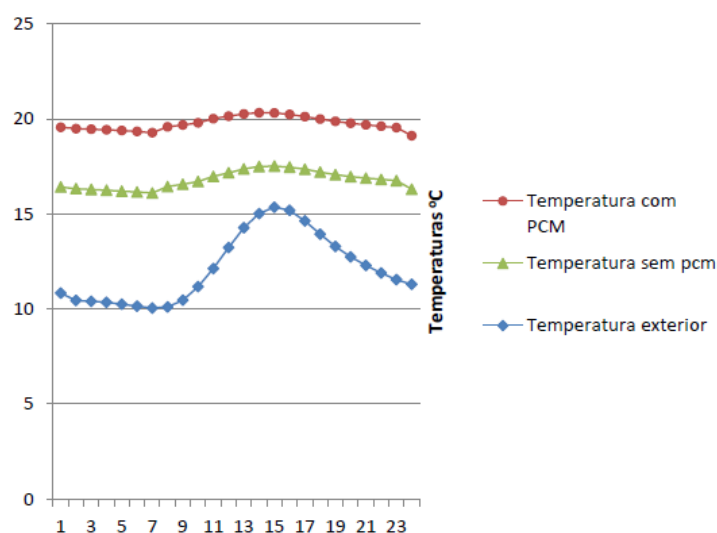


Figura 4.9: Variação da temperatura no Inverno [47]

Como se pode observar na Figura 4.9 existe uma diferença considerável entre as temperaturas com e sem PCM, em que a diferença média entre estas durante as 24 horas é de 3,105 °C. Às 7h foi atingida a temperatura mais baixa exterior, 10,047 °C e a temperatura interior sem PCM e com PCM foi respetivamente 16,033 e 19,368 °C. Também é de notar que durante o período da noite, que corresponde às temperaturas exteriores mais baixas, a temperatura interior mantém-se praticamente constante, pois condiz quando os PCM's estão a dissipar a energia sob a forma de calor [47].

➤ No Verão

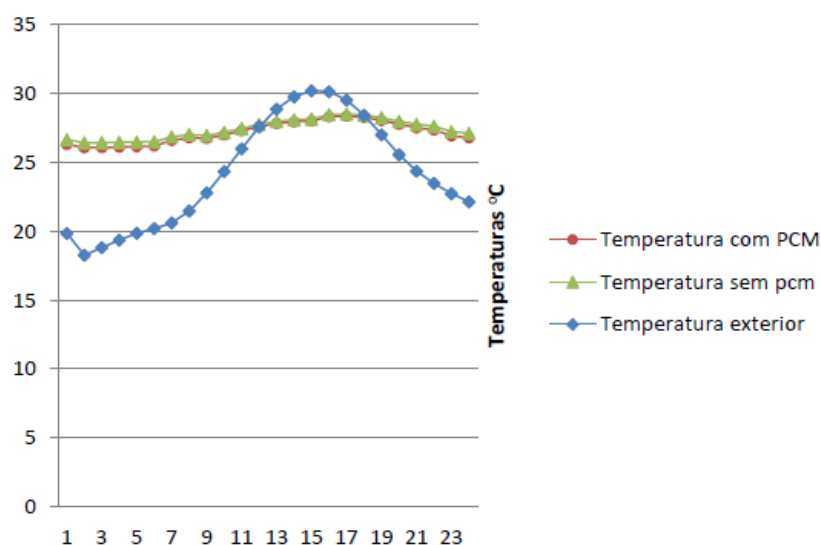


Figura 4.10: Variação de temperatura no Verão [47]

A variação de temperaturas no Verão como se pode observar na Figura 4.10 foi mínima entre a solução com PCM e sem PCM, em que houve uma variação de temperatura de 0,222 °C. A temperatura máxima exterior foi de 30,205 °C às 15h, já a temperatura máxima interior foi registada às 17h em que esta com PCM foi de 28,366 °C e sem PCM 28,508 °C.

Pode-se concluir que a utilização de PCM's trouxe vantagens para o conforto térmico, reduzindo os picos térmicos interiores. O facto de a temperatura interior não se aproximar do ponto de fusão/solidificação do PCM nos 21 °C na estação de Verão, contribuiu para que o armazenamento de energia ficasse limitado e não fosse tão notória a sua utilização como durante o Inverno em que a temperatura interior se aproximou do ponto de fusão gerando melhorias térmicas. Em conclusão a escolha acertada do ponto de fusão do PCM garante um melhor funcionamento [47].

5 Campanha experimental

5.1 Enquadramento

Com a realização do presente trabalho experimental pretende-se desenvolver metodologias no fabrico de BTC's com a incorporação de PCM, avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos BTC com diversas percentagens de PCM e também avaliar a retenção dos PCM's quando submetidos a altas temperaturas.

Para alcançar os objetivos a campanha experimental divide-se em seis fases. Primeiramente fez-se a escolha do solo de forma criteriosa, pois às várias amostras de solos recolhidos vão-se realizar ensaios expeditos para determinar o solo com melhores características. Posto isto, seguidamente, efetuou-se a recolha do solo para, depois, realizar os ensaios laboratoriais para determinar as características geotécnicas do solo. Posteriormente, seguiu-se o dimensionamento das misturas para, numa fase seguinte, se proceder à produção dos BTC. Por fim, os BTC's fabricados foram sujeitos a diversos ensaios de acordo com os objetivos descritos acima.

5.2 Escolha do solo

Os BTC's são compostos por diferentes componentes, sendo o solo o principal elemento. A sua escolha criteriosa origina BTC's com melhores propriedades mecânicas. Neste sentido, recolheram-se várias amostras e realizaram-se ensaios expeditos.

As amostras retiradas são provenientes da região do Minho, mais concretamente do concelho de Barcelos. Perfazendo um total de quatro amostras (Figura 5.1), estas foram recolhidas nas freguesias da Várzea, Gamil, Midões e Sequeade, cuja localização é apresentada no mapa da Figura 5.2.

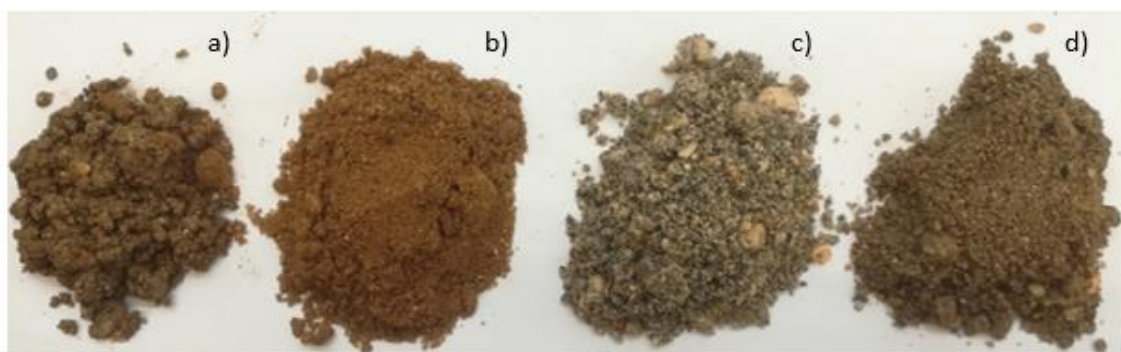


Figura 5.1: Amostras de solo recolhidas: a) Várzea; b) Gamil; c) Midões; d) Sequeade



Figura 5.2: Mapa com a indicação das freguesias onde foram recolhidas as amostras

No Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade do Minho, realizaram-se ensaios expeditos às amostras recolhidas, nomeadamente o ensaio da sedimentação, o ensaio da bola e o equivalente de areia.

5.2.1 Ensaio expedito de sedimentação

Este ensaio tem um procedimento semelhante ao equivalente de areia. Este consiste em adicionar água numa proveta até à primeira marca e de seguida acrescentar cerca de 120 gramas de solo passado no peneiro 4 mm. Posteriormente, com recurso a um agitador submete-se a proveta devidamente selada com uma rolha de borracha a 90 ciclos. Posto isto, adiciona-se água até à

segunda marca e submete-se novamente a proveta a 20 ciclos no agitador. Por fim, coloca-se a proveta na vertical e deixa-se a repousar sem perturbações cerca de 18 horas.

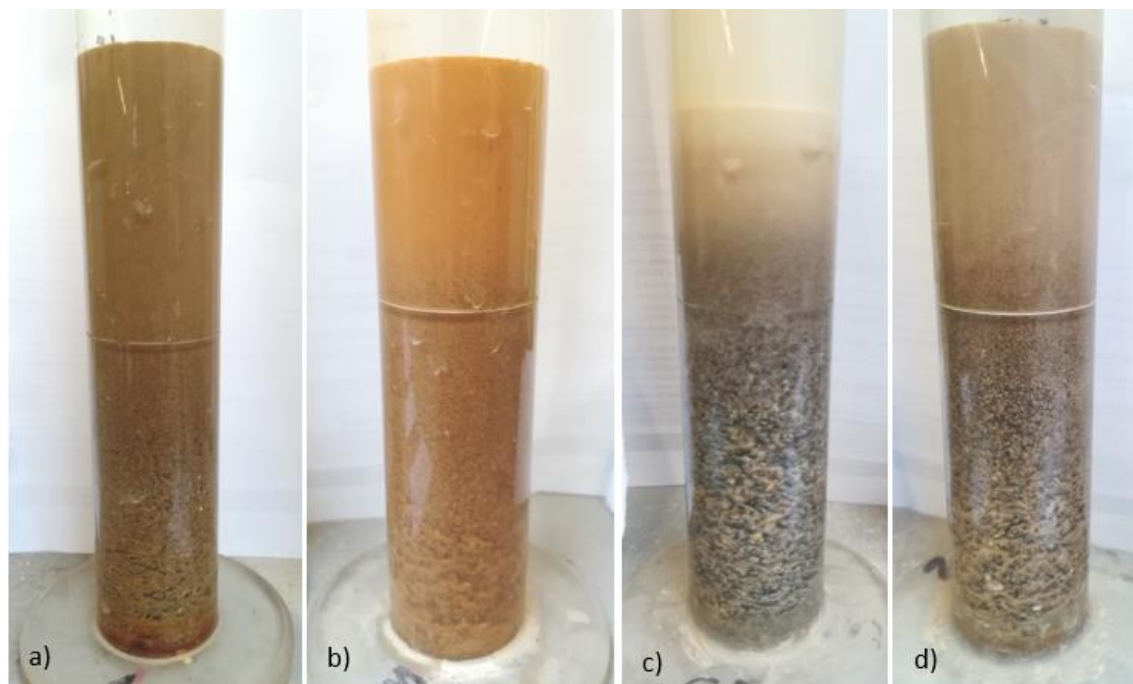


Figura 5.3: Aspeto final dos solos nas provetas no final do ensaio expedito da sedimentação: a) Várzea; b) Gamil; c) Midões; d) Sequeade

Com os ensaios expeditos pretende-se ver qual a altura de material granular correspondente às partículas que ficam depositadas no fundo das provetas (altura sedimentar) e a altura do material que fica em suspensão (altura flocular). Essas alturas são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados do ensaio expedito da sedimentação (medidas em centímetros)

	Várzea	Gamil	Midões	Sequeade
Altura sedimentar	5,0	4,5	8,5	8,0
Altura flocular	12,0	10,9	5,2	6,7

Em análise à Com os ensaios expeditos pretende-se ver qual a altura de material granular correspondente às partículas que ficam depositadas no fundo das provetas (altura sedimentar) e a altura do material que fica em suspensão (altura flocular). Essas alturas são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 é possível observar que os solos que apresentam menor altura de material granular são os solos de Várzea e Gamil. Os solos de Midões e Sequeade apresentam uma altura de material granular muito superior à dos outros solos.

5.2.2 Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia permite estimar a percentagem de areia existente na fração do solo com dimensões inferiores a 2 mm, tendo por base as distintas velocidades de deposição das partículas do solo dispersas numa suspensão de solo e flocculante.

Este ensaio segue a especificação do LNEC E 199 de 1967, à exceção da amostra de solo em que esta foi passada no peneiro 4 mm. De seguida enche-se uma proveta cilíndrica até à marca inferior com flocculante, e introduz-se o solo. A suspensão é agitada com recurso a um agitador mecânico durante 30 segundos e, posteriormente, introduzido flocculante por intermédio do tubo de lavagem, inserido até à base do provete, de modo a provocar a suspensão das partículas mais pequenas acima das partículas de areia, até que a suspensão atinja a marca superior. Por fim, após 20 minutos, medem-se os valores da altura livre total e da altura da camada superior do floculado até à base da proveta cilíndrica [60].

Como se pode observar pela Tabela 5.2 o solo que apresenta maior percentagem de areia é o de Midões, enquanto que o que apresenta menor percentagem é o da Várzea e os restantes solos apresentam valores intermédios. Também nos ensaios expeditos de sedimentação é o solo de Midões que apresenta maior altura de material granular, mas é o solo de Gamil que apresenta a menor altura desse material. Contudo, a altura sedimentar do solo de Gamil está muito próxima da altura sedimentar do solo da Várzea.

Tabela 5.2: Resultados do ensaio expedito do equivalente de areia

	Várzea	Gamil	Midões	Sequeade
Equivalente de areia (%)	20,6	29,9	37,4	33,0

5.2.3 Ensaio expedito da bola

Para a realização do ensaio da bola, utiliza-se uma porção de solo e água. O procedimento consiste em misturar bem o solo com a água até se formar uma bola com boa consistência com auxílio das mãos. A Figura 5.4 ilustra as bolas formadas para as quatro amostras de solo recolhidas.

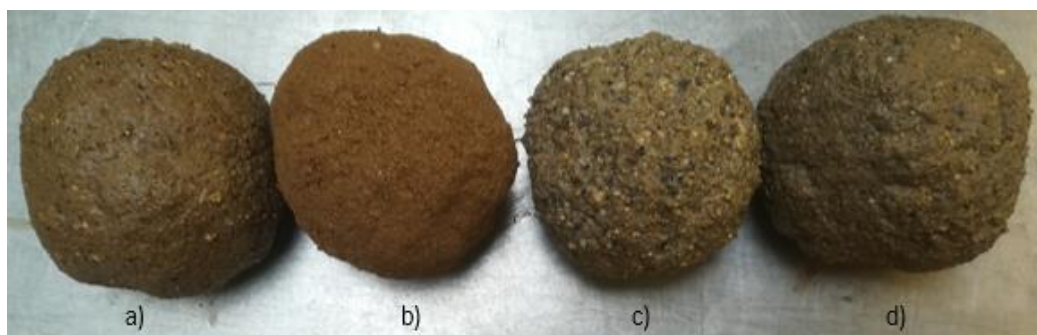


Figura 5.4: Bolas formadas com o ensaio: a) Várzea; b) Gamil; c) Midões; d) Sequeade

Este ensaio depende um pouco do ponto de vista e da sensibilidade do operador, mas sendo o mais importante que o executante consiga formar a bola com boa consistência, significando isso que a quantidade de argila presente no solo é aceitável e muito provavelmente que o solo seja bom para a construção de blocos. Na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados do presente ensaio.

Tabela 5.3: Resultados do ensaio expedito da bola

Localização	Peso do solo seco (g)	Peso do solo a formar a bola (g)	Teor de água (%)
Várzea	1350,6	1683,4	24,6
Gamil	1482,5	1723,0	16,2
Midões	1335,0	1697,1	27,1
Sequeade	1566,9	2022,3	29,1

Como se pode ver na Tabela 5.3, os solos recolhidos na Várzea e em Gamil são aqueles que permitem obter uma bola consistente com o menor teor em água. Para além disso, estes solos apresentam, no ensaio expedito de sedimentação, uma menor altura de material granular o que lhes permite ter uma maior consistência na formação da bola. À maior quantidade de material fino destes solos corresponderá uma percentagem de argila cujo papel é determinante na construção dos blocos de terra. Tendo em conta estes dois parâmetros, são excluídos os solos de Midões e de Sequeade. Para optar entre o solo da Várzea e de Gamil recorreu-se à análise visual da amostra. Isso permitiu identificar a existência de matéria orgânica no solo da Várzea. Dado ser de evitar a presença de matéria orgânica na construção de blocos de terra, optou-se por escolher o solo de Gamil para a continuação dos estudos que se apresentam a seguir.

5.3 Recolha do solo e determinação da massa volúmica *in situ*

Como determinado anteriormente, o solo escolhido é o de Gamil. Este solo é proveniente de um terreno numa zona de escavação para futuramente se construir um pavilhão.

Como se pode visualizar na Figura 5.5, o solo apresenta muito cascalho e pedregulhos. Para a sua extração primeiramente removeu-se uma camada superficial, que podia conter matéria orgânica, e só depois é que se extraiu o solo, cerca de $0,60 \text{ m}^3$.



Figura 5.5: Aspeto visual do solo escolhido

Para a determinação da massa volúmica cravou-se um tubo cilíndrico de aço no solo até à face superior do mesmo ficar soterrada. De seguida limpou-se o solo circundante do tubo e retirou-se o mesmo rasando ambas as faces, como mostra na Figura 5.6.



Figura 5.6: Processo de extração do solo para a determinação da massa volúmica

O tubo de aço utilizado tem de altura 393 mm, de diâmetro interno 82,9 mm e um peso de 2,42 kg. O peso do provete cilíndrico com um solo é de 6,32 kg, o que perfaz um peso do solo de 3,90 kg.

Cálculo da massa volúmica:

$$Massa\ volúmica = \frac{3,90}{\pi \times 0,04145^2 \times 0,393} = 1838,54\ kg/m^3$$

5.4 Ensaios laboratoriais

Para a construção dos BTC's, inicialmente é necessário estudar o solo a utilizar, bem como todos os componentes envolventes. Assim, este capítulo pretende estudar a caracterização do solo para a produção dos BTC's. Para proceder à avaliação e caracterização do solo, é necessário recorrer a ensaios laboratoriais realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST). A execução dos ensaios permite a caracterização geotécnica do solo. Neste sentido, realizaram-se os seguintes ensaios: análise granulométrica com sedimentação, limites de consistência, ensaio de compactação proctor, equivalente de areia, azul metileno, a determinação da densidade das partículas sólidas e a análise química (FRX), sendo este último realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica.

Ao longo deste subcapítulo serão descritos os ensaios realizados, bem como os resultados obtidos e sua análise.

Na preparação do solo para a realização dos ensaios, primeiramente peneirou-se o solo com o peneiro 4 mm (à exceção da amostra do solo da análise granulométrica) rejeitando-se a fração retida, e de seguida colocado em estufa durante 24 horas à temperatura de 105 °C de modo a eliminar toda a humidade do solo. Posto isto, procedeu-se à homogeneização e esquartejamento do solo para que as amostras utilizadas nos ensaios possuissem uma distribuição das partículas uniforme. Por fim embalaram-se as amostras nas quantidades necessárias para os ensaios.



Figura 5.7: Homogeneização, esquartejamento e embalagem do solo

5.4.1 Análise granulométrica com sedimentação

Este ensaio tem como objetivo determinar a quantidade de partículas pelo tamanho, a partir de uma determinada amostra de solo, conhecendo assim a textura deste. Para a realização deste

ensaio foram utilizados uma série de peneiros com diferentes aberturas. A análise granulométrica foi realizada conforme a especificação do LNEC E196 de 1966.

Numa primeira fase do ensaio, começa-se por peneirar a amostra até se obter o solo que fica retido no peneiro #10, considerando este como um conjunto de grãos grossos composto por cascalho e areia, dependendo do diâmetro de cada partícula e regista-se a massa da fração que fica em cada peneiro. Numa segunda fase, o solo passado no peneiro #10 foi devidamente esquartelado até se obter uma fração de aproximadamente 100 gramas como indica a especificação. Posteriormente, adicionou-se 100 ml de solução antifloculante à amostra e aquece-se a mesma, por forma a existir uma melhor dispersão entre as partículas e coloca-se a solução num agitador elétrico durante um período de 15 minutos. Em seguida transfere-se a suspensão para um peneiro de #200, e lava-se o solo com água destilada para uma proveta. Neste processo, o solo retido no peneiro #200 é seco em estufa a 105 °C para posteriormente peneirar nos peneiros de dimensão inferior ao #10.

As amostras de solo que passaram pelo #200 são analisadas por sedimentação, de forma a distinguir as percentagens de finos existentes e classificar o solo. O ensaio de sedimentação consiste na medição da velocidade de queda das partículas do solo em suspensão, uma vez que cada partícula de solo tem a sua massa volúmica, o que determina a sua velocidade de queda. Primeiramente, com a proveta de 1000 ml que contém o solo lavado, obstruiu-se a sua abertura com a mão e agita-se vigorosamente. Posto isto, coloca-se a proveta na bancada e cronometra-se o tempo. De seguida introduz-se o densímetro na proveta até uma profundidade ligeiramente superior à posição de flutuação, de modo a não influenciar o resultado e efetuam-se leituras ao fim de 1, 2, 5, 15, 30, 60, 250, 1440 e 2880 minutos (48 horas) [61].

Na Figura 5.8 ilustra os vários momentos do ensaio.



Figura 5.8: Processo de ensaio granulométrico: a) peneiração do solo; b) aquecimento da amostra; c) agitação da mistura; d) transferir a solução para peneiro #200; e) lavagem da mistura; f) medição da suspensão

Pela observação e análise da curva da Figura 5.9 pode-se concluir que o solo apresenta uma granulometria contínua com uma boa distribuição de grãos, estando presentes os quatro tipos: seixo, areia, silte e argila.

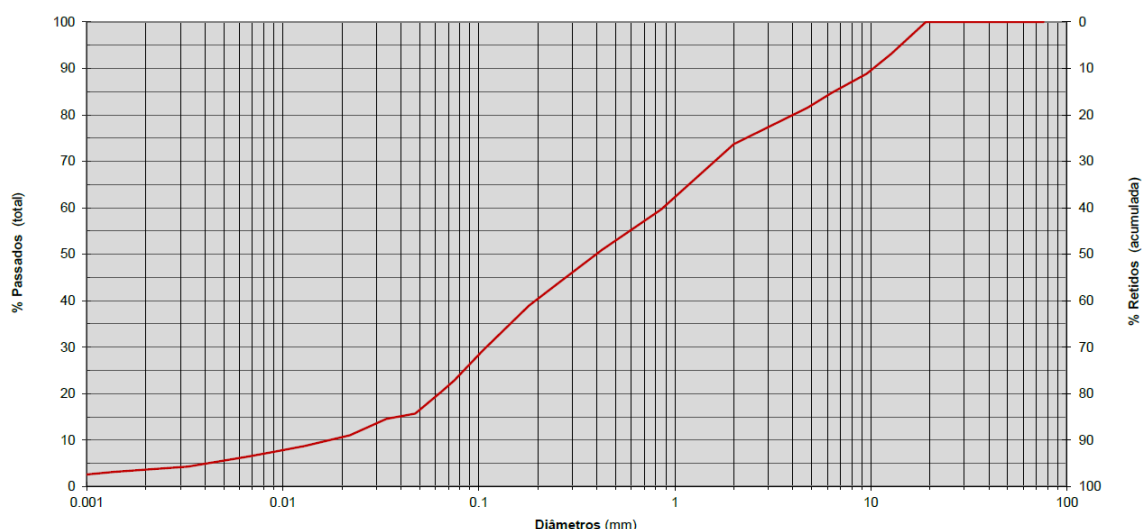


Figura 5.9: Curva granulométrica do solo

Na Tabela 5.4, que traduz a curva granulométrica representada acima, pode-se observar que maioritariamente o solo é composto por areia face à fração relativa à argila.

Tabela 5.4: Percentagens da curva granulométrica

	Fração (mm)	Percentagem (%)
Seixo	> 2,0	26,0
Areia	2 a 0,06	54,5
Silte	0,06 a 0,002	15,5
Argila	< 0,002	4,0

A norma HB 195-2002 (Standards Austrália) recomenda percentagens mínimas de argila de 5% e 10% para BTC's estabilizados e não estabilizados, respetivamente. Ora, a percentagem de 4% obtida neste estudo está ligeiramente abaixo do valor recomendado para solos estabilizados e é bastante inferior aos 10% recomendados para solos não estabilizados o que significa que o teor de argila do solo pode ser insuficiente para desenvolver resistência mecânica e resistência adequadas à água [62].

Posto isto, para além de analisar a curva granulométrica obtida foi também realizada uma análise comparativa com outros fusos granulométricos propostos por outros autores. Deste modo, em primeiro lugar é comparada a curva obtida com o fuso proposto por Viana da Fonseca, que mostra uma curva típica de solos residuais do Norte de Portugal, no qual ensaiou mais de duas centenas de solos (Figura 5.10). O facto de a curva do solo se enquadrar em quase toda a envolvente do fuso, exceto na fração grossa do solo, expressa que este pode ser considerado um solo representativo do norte de Portugal [63].

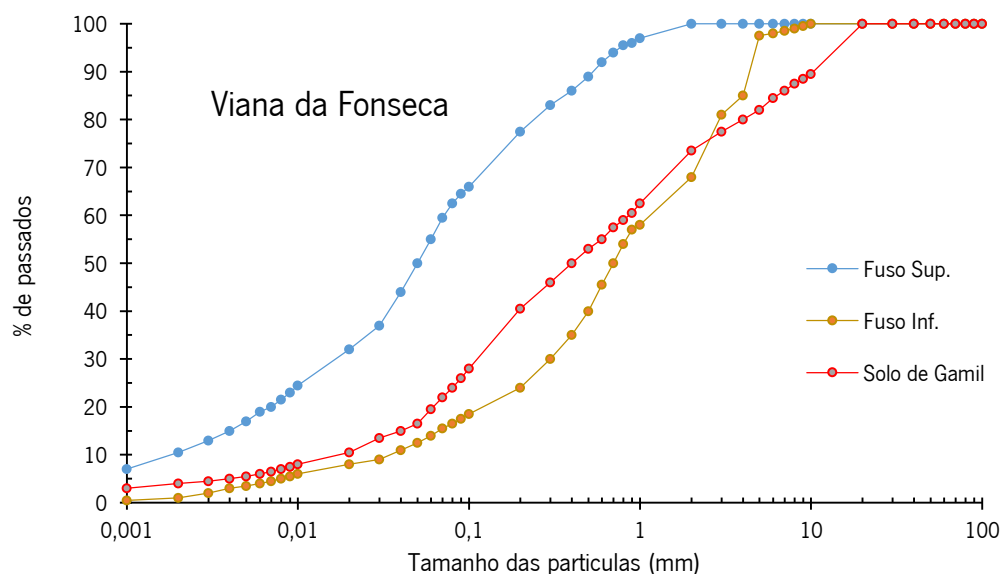


Figura 5.10: Fuso granulométrico apresentado por Viana da Fonseca [63] com a curva do solo de Gamil

O critério proposto por Houben & Guillaud [64] e a norma espanhola UNE 41410 [65] apresentam os limites inferior e superior do fuso granulométrico do solo que consideram adequado para a construção em BTC. Na Figura 5.12 são apresentados esses limites bem como a curva granulométrica do solo de Gamil.

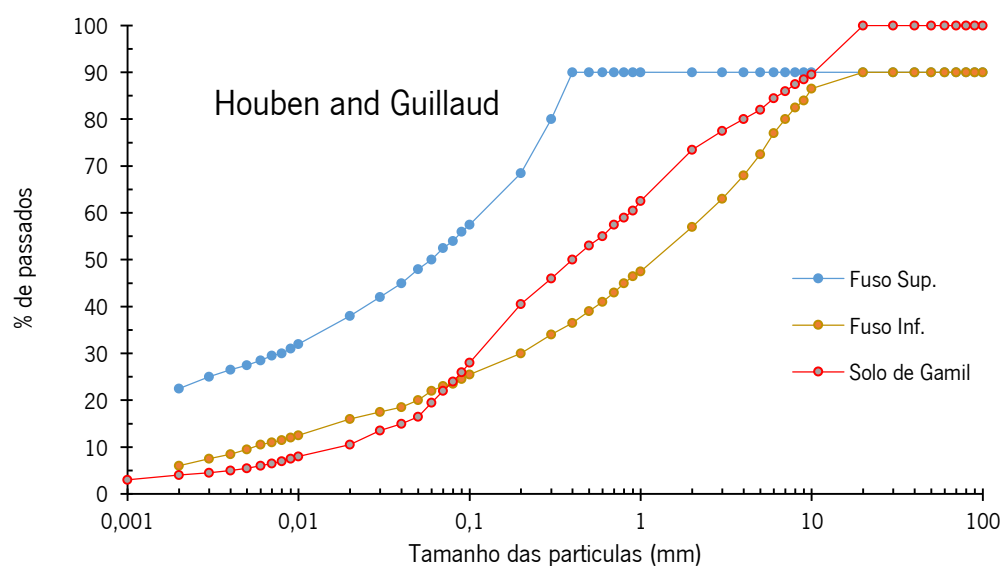


Figura 5.11: Fuso granulométrico apresentado por Houben & Guillaud [64] com a curva do solo de Gamil

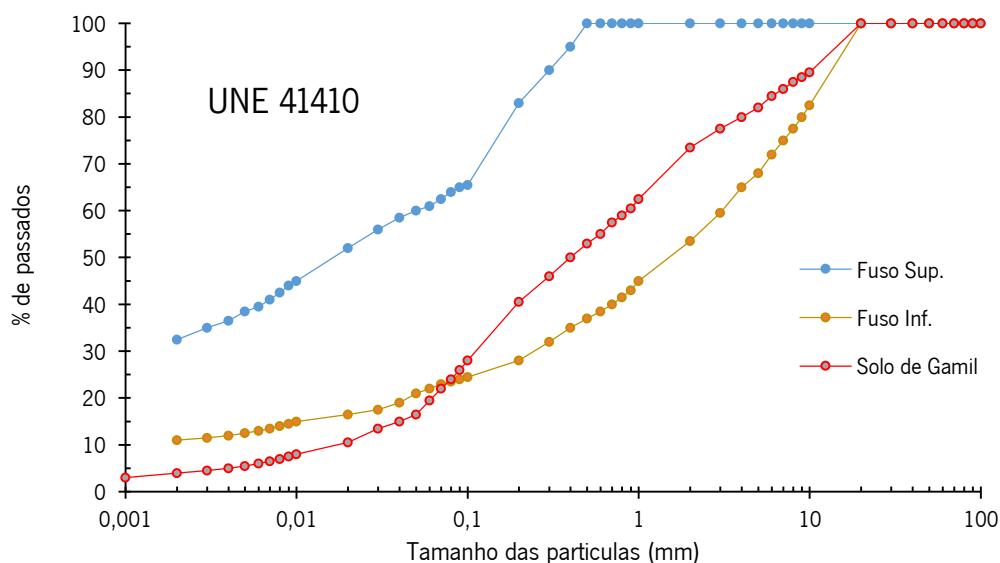


Figura 5.12: Fuso granulométrico apresentado pela norma espanhola UNE 41410 [65] com a curva do solo de Gamil

Pela análise dos fusos granulométricos acima, pode concluir-se que em ambos os casos é realçado o facto de o solo apresentar uma baixa percentagem de finos, pois a curva granulométrica do solo na fração da argila e do silte situa-se abaixo dos fusos inferiores. Também se pode concluir que o solo tem granulometria plausível para a fração grossa, que compreende aproximadamente a fração acima dos 0,08 mm.

5.4.2 Limites de consistência

Os limites de consistência, também conhecidos por limites de Atterberg, são teores em água que correspondem a fronteiras de estados de comportamento distintos de um solo fino e permitem avaliar o comportamento de um solo, que passa no peneiro de 0,420 mm (nº 40 ASTM), quando se encontra na presença de água [66].

O ensaio do limite de liquidez consiste em avaliar o teor em água do solo que representa a passagem do solo do comportamento moldável para o comportamento fluído. Este ensaio foi efetuado segundo a norma NP 143-1969 “Determinação dos limites de consistência”.

Para o ensaio, inicialmente é preparada uma amostra de solo com água destilada, até se formar uma pasta homogênea e consistente. Esta pasta, de seguida é colocada na concha de Casagrande, onde é aberto um sulco com um comprimento de cerca de 1 cm, faz-se bater a concha com uma dada cadência numa base rígida e regista-se o número de pancadas necessárias para que as duas metades da amostra se unam. Em seguida retira-se uma porção de solo da zona do sulco e determina-se o seu teor em água. Repetindo o ensaio quatro vezes, faz-se a média dos teores em

água e esse valor representa o limite e liquidez [67]. Este processo do ensaio é ilustrado na Figura 5.13.

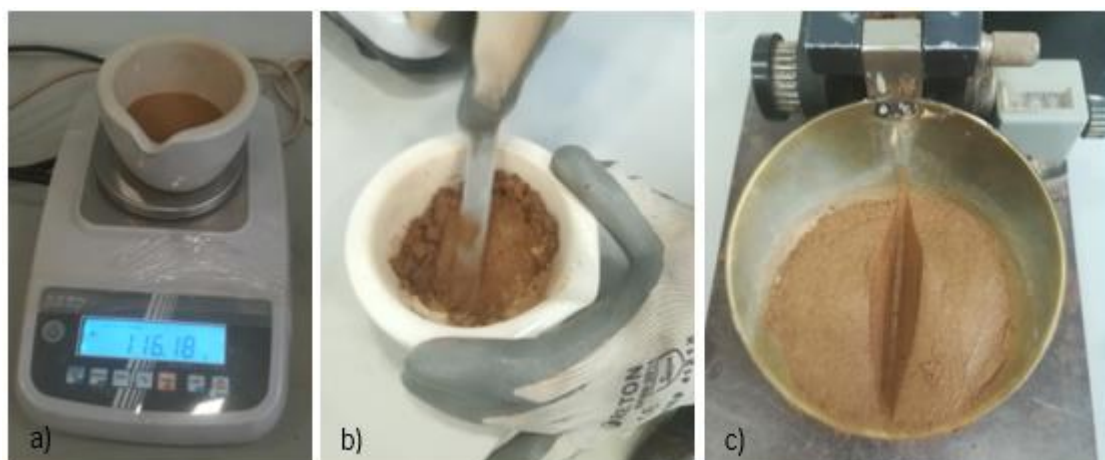


Figura 5.13: Processo de determinação do limite de liquidez: a) pesagem; b) amassadura; c) moldagem

Uma vez que com apenas cinco pancadas o sulco fechou (Figura 5.14) concluiu-se que o solo é não plástico (NP). Isto significa que a parte fina do solo é majoritariamente constituída por silte. Aliás, isso pode ser confirmado na Tabela 5.4 onde a percentagem de silte é cerca de quatro vezes superior à percentagem de argila. Sendo assim, não se realizou o ensaio relativo ao limite de plasticidade.



Figura 5.14: Resultado do ensaio do limite de liquidez

5.4.3 Ensaio de compactação Proctor

O ensaio Proctor consiste na compactação de uma amostra de solo num molde com a finalidade de determinar o teor em água e a massa volúmica seca do solo. A realização da compactação de

amostras com diferentes quantidades de água adicionada permite a definição da curva de compactação. Pela análise da curva é possível aferir o teor em água ótimo, isto é, o teor em água para o qual se obtém a massa volúmica seca máxima.

O presente ensaio foi executado segundo o procedimento definido na especificação do LNEC E197 de 1966.

O tipo de compactação adotada foi a pesada em molde pequeno (modificado). Esta consiste em misturar uma amostra de solo de cerca de 2,5 kg com uma quantidade de água considerada suficiente, preparando diversas amostras com diferentes percentagens de água, diferindo entre si 2%, ou seja, uma amostra com 2%, outra com 4%, outra com 6% e assim sucessivamente até se atingirem os 6 pontos necessários. O objetivo passa por 4 desses pontos se situarem abaixo do teor em água ótimo e os restantes acima.

Para o ensaio começou-se com 4% de água a adicionar ao solo. A compactação foi feita em cinco camadas, através de 25 pancadas (em cada camada) com auxílio de um pilão (4,54 kg com altura de queda de 457 mm), criando-se assim um provete de solo compactado. Registou-se a massa do molde compactado, e do interior do provete moldado, retiraram-se e pesaram-se duas amostras de cada extremidade do molde, aproximadamente a uma profundidade de 2 cm, que servem de base para determinar o teor em água ótimo. Estas amostras foram colocadas em estufa ventilada a 100°C e registada a sua massa seca [68].

Este processo é repetido para cada ponto de solo, sendo que se aumenta a quantidade de água adicionada como descrito acima até aos 14%. Na Figura 5.15 ilustram-se as várias fases do ensaio.

Com os valores resultantes dos ensaios de proctor foi traçada a curva de compactação do solo apresentada na Figura 5.16. Como se pode observar na curva para a massa volúmica máxima de 2,01 g/cm³ obtém-se um teor em água ótimo de 10,02%.

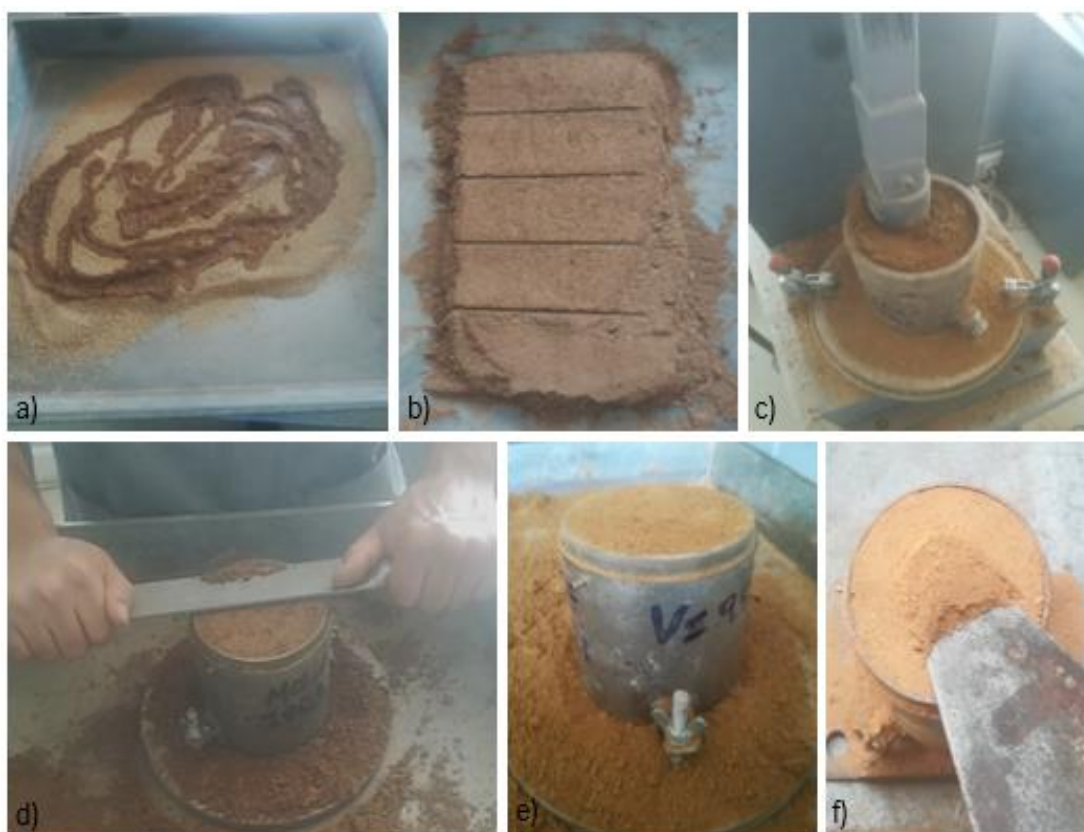


Figura 5.15: Procedimento do ensaio proctor: a) adicionar água ao solo; b) uniformização e divisão do solo em 5 porções; c) compactação pesada do solo; d) rasar o provete; e) aspecto de provete ensaiado; f) recolha da amostra

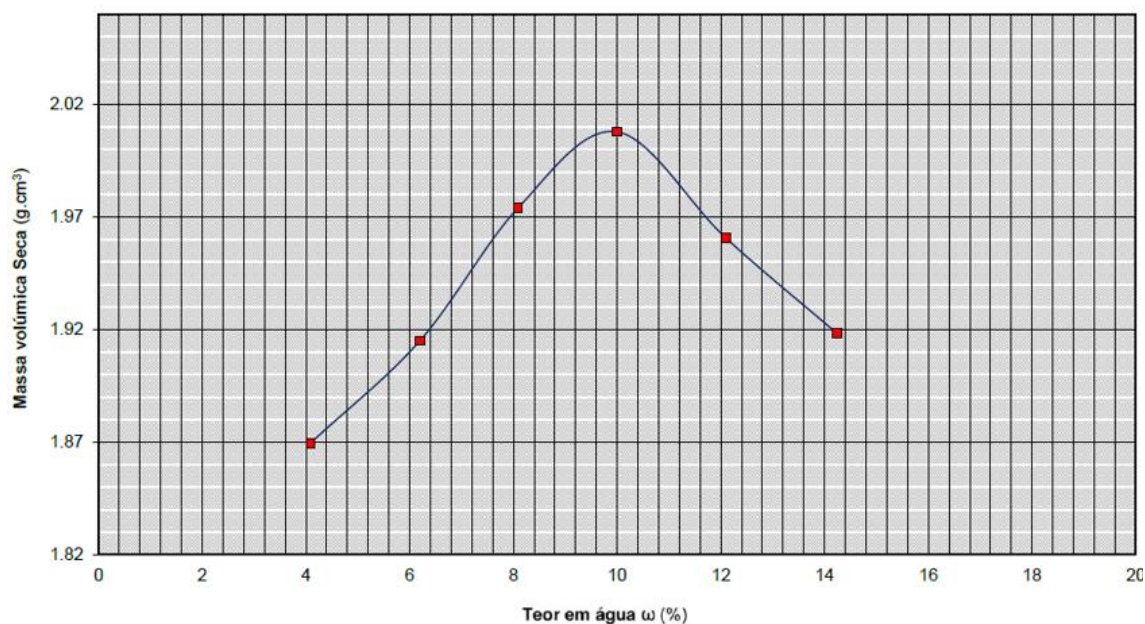


Figura 5.16: Resultado do ensaio proctor

5.4.4 Equivalente de areia

Este ensaio foi efetuado segundo a especificação do LNEC E 199 de 1967 [60], como descrito no capítulo 5.2.2 Equivalente de areia, com a diferença que no presente ensaio o peneiro usado foi

o 2 mm como descreve na norma, o que leva a resultados diferentes obtidos neste capítulo. Deste modo, a percentagem de areia registada para este solo, a partir do ensaio foi de 24,4%.

A Figura 5.17 apresenta o processo de determinação do ensaio.



Figura 5.17: Processo de determinação do equivalente de areia: a) mistura do solo com o floculante; b) agitar a mistura com recurso de um agitador mecânico manual; c) leituras do equivalente de areia

5.4.5 Azul-de-metileno

O ensaio de azul-de-metileno foi executado de acordo com a norma NF P 94 – 068 de 1993, em que consiste na determinação da atividade das argilas contidas num solo, através da troca iónica entre os cátions existentes na superfície das partículas [66].

O ensaio processa-se através da dissolução de cerca de 60 g de solo com dimensões inferiores a 2 mm, numa proveta com 500 ml de água destilada e agitada durante 5 minutos. O corante azul-de-metileno é adicionado de minuto a minuto na mistura, e é retirada uma gota da suspensão sendo esta depositada em papel de filtro. O depósito da suspensão no papel de filtro forma uma mancha azul escura circundada por uma zona húmida sem cor. Este processo é repetido até que seja obtida na zona húmida, circundante à mancha azul, uma auréola azul clara persistente de cerca de 1 mm [69].

No ensaio realizado para 56 gramas de solo utilizado, adicionou-se por duas vezes o azul-de-metileno (perfazendo um total de 12 ml). Na Figura 5.18c), a segunda amostra tem a auréola azul clara, o que dá por terminado o ensaio. Pode-se concluir que o valor de azul-de-metileno é 0,21 g/100g.

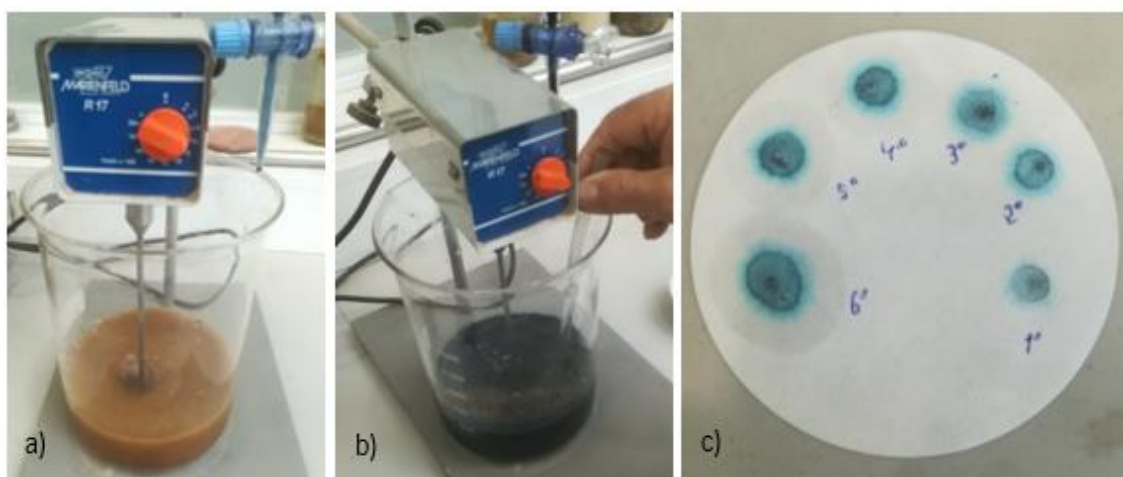


Figura 5.18: Processo de determinação do azul-de-metileno: a) misturar o solo; b) misturar com o corante; c) resultado

5.4.6 Densidade das partículas sólidas

O ensaio da determinação da densidade das partículas sólidas ou também conhecido por massa volúmica segue a norma portuguesa NP 83 de 1965. A massa volúmica das partículas sólidas é o quociente da massa das partículas pelo volume que as mesmas ocupam depois de excluídos todos os seus vazios.

Por norma as partículas dos solos, em geral, têm massas volúmicas que pouco variam de caso para caso, e a adoção do valor de $2,65 \text{ g/cm}^3$ conduz normalmente nas aplicações práticas correntes a resultados com suficiente precisão. Contudo, para a presente dissertação determinou-se a massa volúmica do solo em questão.

Para o ensaio utilizou-se cerca de 60 gramas de solo, previamente seco em estufa e passado no peneiro #4, e registou-se a sua massa numa balança com precisão de 0,01 g. Para o cálculo do volume recorreu-se ao método do picnómetro, registando-se a massa do picnómetro preenchido apenas com água e a massa do picnómetro com a amostra de solo e preenchido com água. De modo a retirar o ar presente no interior do picnómetro, a mistura foi previamente fervida, agitada durante cerca de um minuto, deixada 24 horas em repouso e, por fim, foi repostada a água com o auxílio de uma seringa e pesada novamente [70]. Como resultado do ensaio a massa volúmica do solo é $2,75 \text{ g/cm}^3$.

Na Figura 5.19 é possível observar o procedimento do ensaio, desde a medição da temperatura à pesagem final do solo nos picnómetros.



Figura 5.19: Processo de determinação da massa volúmica: a) medição da temperatura; b) pesagem da amostra; c) fervura da amostra; d) pesagem da amostra após a fervura

5.4.7 Análise química

A composição química do solo foi determinada através dos ensaios de fluorescência de raios X (FRX). Este ensaio baseia-se na medida das intensidades dos Raios-X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitada [71].

Para a realização do ensaio peneirou-se cerca de 80 gramas de solo passado no peneiro 63 μm e com recurso ao analisador EA1000VX (Figura 5.20), obtém-se a composição química do solo, como mostra a Tabela 5.5.



Figura 5.20: Analisador FRX EA1000VX

Tabela 5.5: Composição química do solo

Componente químico	Fórmula química	Percentagem (%)
Dióxido de silício ou sílica	SiO ₂	58,0
Óxido de alumínio ou alumina	Al ₂ O ₃	25,7
Óxido de ferro (III)	Fe ₂ O ₃	11,5
Óxido de potássio	K ₂ O	3,13
Dióxido de titânio	TiO ₂	1,35
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	0,17
Óxido de cálcio	CaO	0,12
Óxido de manganês	MnO	0,04

Através da análise da Tabela 5.5 podemos concluir que o solo é composto majoritariamente por dióxido de silício, em cerca de 58%. Possui ainda quantidades consideráveis de óxido de alumínio e óxido de ferro, com percentagens de 25,7% e 11,5 %, respetivamente. Todos os outros componentes químicos do solo representam apenas 4,8% do total dos componentes. Como se pode observar em imagens do solo apresentadas anteriormente (por exemplo, ver Figura 5.13 e Figura 5.15) o mesmo apresenta uma coloração avermelhada que lhe é conferida pela percentagem significativa de óxido de ferro.

5.5 Outros elementos para a mistura dos BTC

Como se constata ao longo dos capítulos anteriores, o solo é o principal material para o fabrico dos BTC. Para o dimensionamento das misturas assume um papel importante a sua massa volúmica. Tendo em atenção que o solo usado nas misturas apresenta uma densidade das partículas de 2,75, a sua massa volúmica será de 2750 kg/m³.

Para o fabrico dos BTC's houve necessidade da utilização de um ligante, designadamente o cimento Portland CEM I 42.5 R (anexo 1) com uma massa volúmica real de 3150 kg/m³. Este cimento é de elevado desempenho com grande reatividade e rápido desenvolvimento de resistência mecânica. O objetivo do uso deste ligante é para obter maiores resistências mecânicas e também colmatar a falta de argila no solo [72].

Um dos objetivos da presente dissertação é estudar o comportamento dos BTC com a incorporação de materiais de mudança de fase. Deste modo, o PCM utilizado é da RUBITHERM do tipo RT 22 HC (anexo 2). Este material tem uma alta cristalinidade e uma capacidade de

armazenamento de 190 kJ/kg, que é maior em cerca de 30 % em comparação com os materiais de armazenamento convencionais. Este PCM é orgânico e apresenta uma massa volúmica de 700 kg/m³ no estado líquido e 760 kg/m³ no estado sólido com uma temperatura de transição entre os estados solido/líquido de 22 °C [73].

Por fim, utilizou-se água potável, tendo esta uma massa volúmica de 1000 kg/m³.

5.6 Dimensionamento das misturas

Após a realização dos ensaios da caracterização do solo e para numa fase seguinte proceder ao fabrico dos BTC, primeiramente é necessário efetuar o dimensionamento das misturas.

Como referido anteriormente realizaram-se 3 tipos de misturas, uma com solo e água, outra com solo, cimento (em diversas percentagens) e água, e por fim outra com solo, cimento, PCM (em diversas percentagens) e água.

A mistura de referência que corresponde à mistura do solo e água foi dimensionada de acordo com o valor do teor em água obtido no capítulo 5.2.3

Ensaio expedito da bola, pois desta forma garante-se uma trabalhabilidade adequada. Recorrendo à definição do teor em água e usando o teor em água obtido no ensaio da bola (16,2%) obtém-se a seguinte relação entre o peso da água, W , e o peso do solo seco, S :

$$W = 0.162 \times S \quad (5.1)$$

Sendo assim, através da expressão (5.1), para cada peso de solo pretendido é possível calcular diretamente a quantidade de água necessária para a mistura.

A segunda mistura é composta por solo, cimento e água, tendo sido estabelecidas para o cimento as percentagens de 5, 10 e 20 %. O cálculo do dimensionamento da mistura procedeu-se através dum sistema de equações, em que a primeira equação é a relação entre o solo e o cimento nas percentagens acima referidas, a segunda é a razão líquido/sólido, em que esta é igualada ao teor ótimo da bola, e por fim a equação fundamental do dimensionamento que relaciona os materiais com as suas massas volúmicas reais, em suma temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 0.05 \times S \\ \frac{W}{S + C} = 0,162 \\ \frac{S}{\gamma_s} + \frac{C}{\gamma_c} + \frac{W}{\gamma_w} = 1 \end{array} \right. \quad (5.2)$$

De notar que, na primeira equação é o cálculo para a percentagem de cimento de 5%, faltando ilustrar o sistema para as restantes percentagens. Os resultados do sistema de equações (5.2) encontram-se resumidos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Quantidades da mistura: solo, cimento e água (kg/m³)

Quantidade de Materiais (kg/m³)	% CEM		
	5	10	20
SOLO	1819	1743	1607
ÁGUA	309	311	312
CEM I 42,5	91	174	321

De referir que para as três misturas onde foi incorporado cimento nas três percentagens referidas foi realizado o ensaio da bola (Figura 5.21) e como resultado a bola apresentou uma boa consistência e firmeza, o que indica que o teor de água adicionado (16,2%) conduz a uma boa mistura para o fabrico dos BTC.



Figura 5.21: Ensaio da bola da mistura solo, cimento e água: a) 5% cimento; b) 10% cimento; c) 20% cimento

Por fim, a mistura composta por solo, cimento, água e PCM, em que as percentagens de PCM impostas inicialmente no plano da dissertação de 40, 80 e 120% relativamente ao cimento, revelaram-se inviáveis, pois davam uma quantidade de água muito baixa devido ao PCM nos cálculos entrar como líquido, o que tem como consequência a não hidratação do cimento, e este, deixa de funcionar como ligante. Para solucionar este problema foram adotadas outras

percentagens de PCM, 25, 50 e 75%. No que respeita a dosagem de cimento, esta foi de acordo com o capítulo 5.9.1 “Ensaio à compressão preliminar”, em que estipula que a dosagem de 10% de cimento é a ótima (esta opção pela percentagem de 10% de cimento é justificada nesse mesmo capítulo). O dimensionamento da mistura é semelhante à anterior com algumas alterações: a dosagem de cimento é fixada em 174 kg/m^3 que corresponde a 10% de cimento como se pode observar na Tabela 5.6, acrescenta-se uma nova equação ao sistema em que estipula a relação entre o PCM e o cimento (no sistema (5.3) ilustra para 25% de PCM, faltando as restantes percentagens), a razão líquido/sólido incrementa-se o PCM no numerador, uma vez que o PCM na mistura funciona como líquido apesar de quando a temperatura baixar o seu ponto de fusão este comportar-se como um sólido, e na equação fundamental acrescenta-se a parcela relativa ao PCM, em resumo temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 174 \\ PCM = 0,25 \times C \\ \frac{W + PCM}{S + C} = 0,162 \\ \frac{S}{\gamma_S} + \frac{C}{\gamma_C} + \frac{W}{\gamma_W} + \frac{PCM}{\gamma_{PCM}} = 1 \end{array} \right. \quad (5.3)$$

O resultado do sistema de equações para todas as percentagens de PCM encontra-se sintetizado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Quantidades da mistura: solo, cimento, água e PCM (kg/m^3)

Quantidade de Materiais	% PCM		
	25	50	75
(Kg/m³)			
SOLO	1707	1671	1636
ÁGUA	261	212	163
10 % CEM I 42,5	174	174	174
PCM	44	87	131

De notar que para estas três misturas também foi realizado o ensaio da bola (Figura 5.22) e como nas misturas com solo, cimento e água o resultado foi semelhante, a bola apresentou uma boa consistência e firmeza, o que traduz que o teor de líquido adicionado (16,2%) conduz a uma boa mistura para o fabrico dos BTC.



Figura 5.22: Ensaio da bola da mistura solo, cimento, PCM e água: a) 25% PCM; b) 50% PCM; c) 75% PCM

5.7 Fabrico dos BTC

O processo de fabrico dos BTC é dividido em 4 fases distintas: a preparação e pesagem dos materiais necessários, a mistura dos materiais, a prensagem dos blocos e a sua respetiva cura.

Quanto à primeira fase, a preparação do solo, este foi passado no peneiro 4 mm e seco em estufa durante 24 horas a 105 °C. Na pesagem dos materiais, com auxílio das dosagens calculadas no capítulo anterior determinaram-se as quantidades de materiais necessários para cada bloco ou conjunto de blocos, dependendo de quantos blocos se iam executar.

Na fase seguinte, a mistura dos materiais realizou-se com auxílio de uma misturadora mecânica de eixo vertical. Para realizar a mistura de referência (solo e água), começou-se por colocar o solo na misturadora e de seguida adicionou-se água lentamente. Quanto à mistura com solo, cimento e água, primeiramente adiciona-se o solo e de seguida o cimento e misturou-se até se alcançar uma mistura homogénea, e de seguida acrescentou-se água lentamente. Durante todo este processo de homogeneização foi necessário parar a misturadora e, com uma colher de pedreiro, misturar o material seco que não foi alcançado pelas pás da misturadora, de forma a obter uma mistura o mais homogénea possível, como se pode observar na Figura 5.23.



Figura 5.23: Processo de fabrico da mistura: a) misturar a mistura seca; b) adicionar água à mistura; c) misturar o material seco

Quanto à prensagem dos blocos, esta foi realizada com o auxílio da prensa manual da marca “Appro-Tecno” e modelo “Terstaram” com um molde de 220 x 105 x 135 mm, como mostra a Figura 5.24.



Figura 5.24: Prensa manual “Terstaram”

Primeiramente pesou-se a quantidade de solo necessária para cada bloco, de forma a que cada um tivesse a mesma quantidade de material para garantir a uniformidade de todos os BTC fabricados. De seguida, preencheu-se o molde da prensa com a mistura produzida, tendo-se sempre o cuidado de pressionar os cantos do mesmo, de modo a garantir que não existem espaços vazios na face inferior do molde. Após esta primeira pressão, completa-se o preenchimento do molde, finalizando-se o processo com o nivelamento da mistura. Depois de comprimido o bloco na prensa, este foi cuidadosamente retirado da prensa.



Figura 5.25: Processo de prensagem do BTC: a) introdução da mistura no molde; b) nivelamento da mistura; c) BTC prensado dentro do molde; d) BTC prensado fora do molde

Por fim, no processo de cura, os BTC's foram colocados sobre uma superfície plana durante 28 dias, com a particularidade de deixar espaço entre eles para que houvesse circulação de ar, como mostra a Figura 5.26.



Figura 5.26: Processo de cura dos BTC

5.8 Metodologia de incorporação do PCM nos BTC

Para realizar a incorporação do PCM nos BTC estudaram-se várias alternativas, sendo que todas elas eram em função de aquecer ou os materiais ou os equipamentos acima da temperatura de fusão do PCM. Por fim, adotou-se por aquecer quer os materiais (solo, cimento, água e PCM), quer os equipamentos (prensa, bacia e as pás da misturadora) em estufa à temperatura de 60°C durante 1 hora, à exceção da prensa em que foi colocado um aquecedor sobre esta durante 1 hora, como mostra a Figura 5.27.



Figura 5.27: Aquecimento da prensa

Com todos os componentes colocados a aquecer, a temperatura variou entre eles no final do tempo pretendido. A média obtida em cada um pode ser consultada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Temperatura dos componentes da mistura

Componente	Temperatura (°C)
Solo	55
Cimento	53
Água	45
PCM	56
Balde e pás da misturadora	40
Prensa	42

Em suma, a metodologia compreende os seguintes pontos:

1. Pesa-se os materiais e coloca-se a aquecer todos os componentes como descrito acima;
2. Ao fim de 1 hora, coloca-se o solo na misturadora e logo de seguida o cimento e mexe-se até à mistura ficar homogénea;
3. Com a misturadora em funcionamento, adiciona-se o PCM lentamente e deixa-se mexer até a mistura ficar novamente uniforme;
4. Repetidamente, com a misturadora em funcionamento, adiciona-se a água lentamente e deixa-se mexer até a mistura ficar homogénea;
5. Pesa-se a quantidade de solo pretendida para um bloco e coloca-se na prensa e efetua-se a prensagem;
6. Por fim, coloca-se o bloco numa superfície retificada durante os 28 dias de cura.

De notar que, para realizar a mistura utilizou-se uma misturadora mecânica de eixo vertical de pequenas dimensões ao invés da utilizada nas anteriores, e também durante o processo da mistura utilizou-se um secador para manter a temperatura de cerca de 40°C da mistura, como se pode observar na Figura 5.28a), e também todo o processo de fabrico dos BTC com a incorporação de PCM.



Figura 5.28: Processo de fabrico da mistura: a) misturadora e secador utilizados; b) adicionar o solo e o cimento; c) adicionar o PCM e a água à mistura; d) verificação da temperatura da mistura

5.9 Ensaios realizados aos BTC

Os ensaios abaixo descritos foram realizados após a cura de 28 dias dos BTC e foram realizados na Universidade do Minho no Laboratório de Estruturas, no Laboratório de Materiais de Construção e no Laboratório de Vias de Comunicação.

5.9.1 Ensaio à compressão preliminar

O ensaio à compressão, do ponto de vista da resistência é a análise mais significativa. Este ensaio consiste na colocação do BTC entre dois pratos numa prensa mecânica ligada a um sistema hidráulico, e seguidamente a aplicação de uma força constante até à rutura do mesmo.

A resistência à compressão dos BTC's varia de acordo com o tipo de solo e com o uso de ligantes ou adjuvantes. Quanto à resistência à compressão mínima não há um requisito mínimo a alcançar, mas diversos autores mencionam vários valores que os BTC's devem cumprir, como se pode observar na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Resistência mínima à compressão [74] [43]

Autor	Resistência mínima à compressão (MPa)
NTC 5324	2,0
NBR 8491	1,7
UNE 41410	1,3
DIN 18945	2,5
CRATerre	2,0

Este ensaio foi realizado aos BTC's estabilizados com cimento, com o intuito de selecionar qual a composição de cimento (5, 10 ou 20%) ótima para as condições desejadas, pois com o resultado deste ensaio procede-se o fabrico dos BTC's com incorporação PCM mas com a composição de cimento ótima.

A realização do ensaio segue a norma EN 772-1 de 2002 [75] mas com algumas exceções: a quantidade de provetes a ensaiar e a retificação dos mesmos.

Para a execução do ensaio utilizaram-se três BTC de cada mistura, que primeiramente foram pesados e medidos. Seguidamente, a retificação dos provetes foi efetuada com cartão, que se colocou em ambas as faces (superior e inferior), pois ajuda a que o carregamento executado seja uniforme. De seguida, os BTC's foram colocados e alinhados com o centro do prato da prensa, como se pode observar na Figura 5.29. A carga realizada durante o ensaio teve um controlo de deslocamento a uma velocidade de 0,5kN/s.

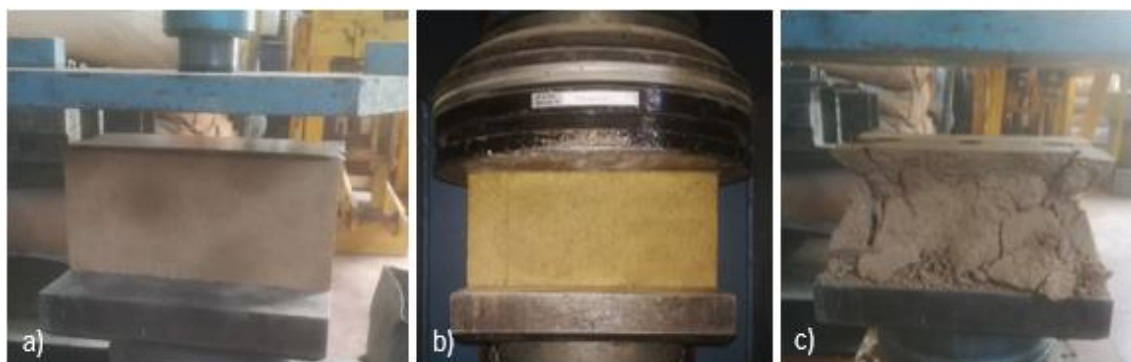


Figura 5.29: Ensaio à compressão simples: a) preparação do BTC; b) realização do ensaio; c) rotura do BTC

O tempo de cura dos provetes ensaiados foi de 14 dias e não de 28 dias, pois os resultados obtidos na Tabela 5.10 são para uma comparação entre as diferentes percentagens de cimento e para observar qual a ordem de grandeza até à rotura.

Tabela 5.10: Resultados aos 14 dias com incorporação de cimento

% Cimento	5%	10%	20%
Provete 1 (kN)	66,5	144,8	251,5
Provete 2 (kN)	57,8	140,1	231,1
Provete 3 (kN)	60,0	141,1	254,6
Média (kN)	61,4	142,0	245,7
Tensão (MPa)	2,8	6,5	11,2

Mediante os resultados obtidos pode-se concluir que para todas as percentagens de cimento a tensão de rotura é bastante superior à mínima aconselhada por diversos autores mencionados na Tabela 5.9, e também aos tijolos cerâmicos em que a tensão de rotura é de 1,5 a 1,9 MPa (anexo 3) [76], o que permite concluir com a estabilização dos blocos obtém-se uma boa resistência à compressão.

A escolha da composição ótima de cimento recaiu na percentagem de 10%, pois sabendo que com a incorporação de PCM a resistência à compressão dos BTC diminuirá, e deste modo assegura-se a tensão de rotura não baixará os mínimos aconselhados.

A título de curiosidade a resistência à compressão dos BTC para as diferentes percentagens de cimento segue aproximadamente uma distribuição linear como se pode observar na Figura 5.30.

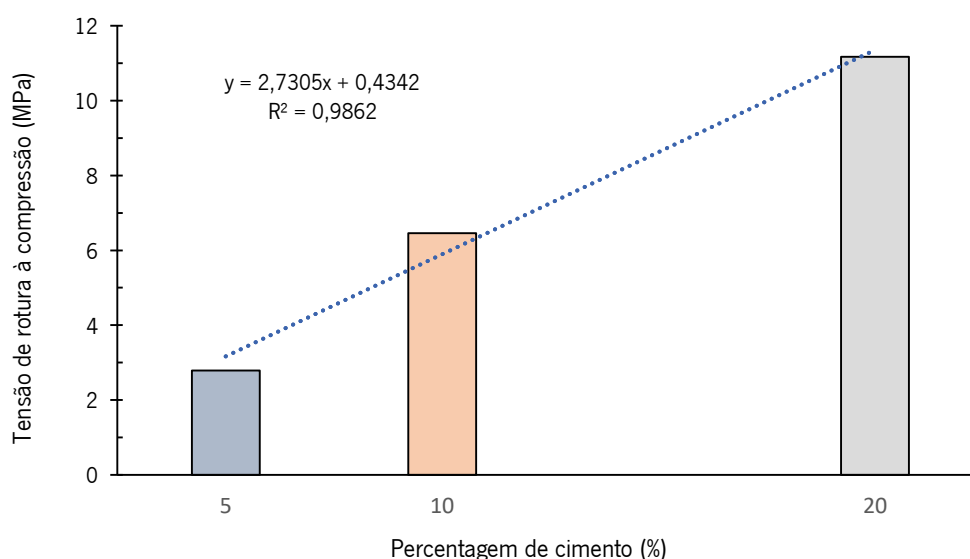


Figura 5.30: Resultados aos 14 dias com incorporação de cimento

5.9.2 Ensaio de compressão e módulo de elasticidade

Este ensaio segue a norma e procedimentos do ensaio referido no capítulo anterior, com a diferença do número de BTC's ensaiados e da retificação dos mesmos. Relativamente à

quantidade de BTC's ensaiados, no presente ensaio testaram-se seis provetes por cada mistura realizada (mistura de referência, 10% cimento, 10% cimento com 25% PCM, 10% cimento com 50% PCM e 10% cimento com 75% PCM), perfazendo um total de 30 ensaios.

A retificação dos provetes diverge do capítulo anterior, pois no presente capítulo vai-se avaliar o módulo de elasticidade dos BTC, e o cartão influencia os resultados. Deste modo, para a face inferior adotou-se a retificação por desgaste, que consiste em desgastar a face do BTC numa superfície rugosa e seguidamente numa superfície lisa para dar um acabamento regular ao BTC. Quanto à face superior, em que esta é mais sinuosa, usou-se betume de poliéster de baixa densidade em que se colocou uma camada de espessura mínima e por fim nivelou-se a mesma, como mostra na Figura 5.31.



Figura 5.31: Retificação dos BTC's: a) desgaste numa superfície rugosa; b) desgaste numa superfície lisa; c) e d) espalhamento do betume de poliéster; e) nivelamento do betume de poliéster

Para a determinação do módulo de elasticidade colocou-se três transdutores para medição do deslocamento linear (LVDT's) nos blocos, dois numa face do BTC nas extremidades e um na outra

face do BTC no centro, para medir o deslocamento vertical da mesma durante o ensaio. Este deslocamento foi medido entre os pratos da prensa, e não com os LVDT's colados no BTC, pois esta fixação não era segura, o que resultava num ensaio pouco fidedigno.

De modo geral, o procedimento de ensaio é apresentado na Figura 5.32.



Figura 5.32: Ensaio à compressão: a) alinhamento do BTC no prato; b) colocação dos LVDT's; c) BTC pronto a ser ensaiado; d) aparecimento das primeiras fissuras no BTC; e) BTC atingiu a rotura

As resistências à compressão obtidas nos ensaios aos BTC para as diversas misturas encontram-se descritas na Tabela 5.11 e representadas na Figura 5.33.

Tabela 5.11: Resultados da resistência à compressão dos BTC's

Mistura	Tensão de rotura à compressão (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
REFERÊNCIA	1,1	0,0	3,4
10CEM	7,3	0,5	6,5
10CEM 25PCM	8,0	0,6	7,7
10CEM 50PCM	6,5	0,2	3,5
10CEM 75PCM	3,6	0,4	12,2

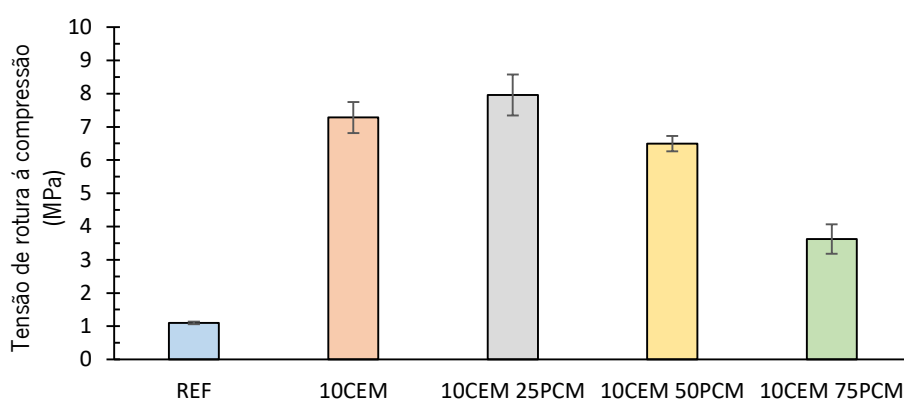


Figura 5.33: Resistência à compressão dos BTC's

Em análise aos resultados apresentados acima, pode-se concluir que a incorporação de cimento é extremamente benéfica para a resistência à compressão dos BTC, pois há um aumento significativo da mesma, cerca de 85%, em relação à mistura de referência. Também se pode findar que o PCM em quantidades elevadas é desfavorável para a resistência à compressão, pois nestas misturas há pouca quantidade de água para a quantidade de PCM, o que se reflete numa diminuição da hidratação do cimento. No sentido oposto, para misturas com baixas percentagens de PCM, traduz num ligeiro aumento da resistência à compressão, cerca de 0,7 MPa em relação à mistura com 10% de cimento. Comparando a mistura de menor percentagem de PCM com a de maior percentagem de PCM pode-se verificar que há uma redução de 55% na resistência à compressão, cerca de 4,4 MPa.

De notar que a mistura com a resistência à compressão mais baixa, mistura com 10% de cimento e 75% de PCM, com uma resistência de 3,6 MPa é superior à resistência mínima aconselhada por diversos autores mencionada na Tabela 5.9.

Confrontando os valores obtidos na Tabela 5.10 com a Tabela 5.11 nomeadamente a mistura de 10% de cimento, pode verificar-se que aos 14 dias de cura a mistura obtém uma resistência de 6,5 MPa, enquanto que aos 28 dias adquire 7,3 MPa. Este ligeiro aumento da resistência à compressão era espectável, pois com o uso do cimento a resistência segue uma função exponencial, em que nos primeiros dias de cura há um rápido aumento e vai estabilizando ao longo do tempo.

O módulo de elasticidade é a propriedade que determina a rigidez dos BTC's. Para a sua determinação os LVDT's registaram os valores da deformação do bloco à medida que o atuador exercia a força de 0,5 kN/s. A Figura 5.34 representa as curvas carga-deformação das diferentes misturas.

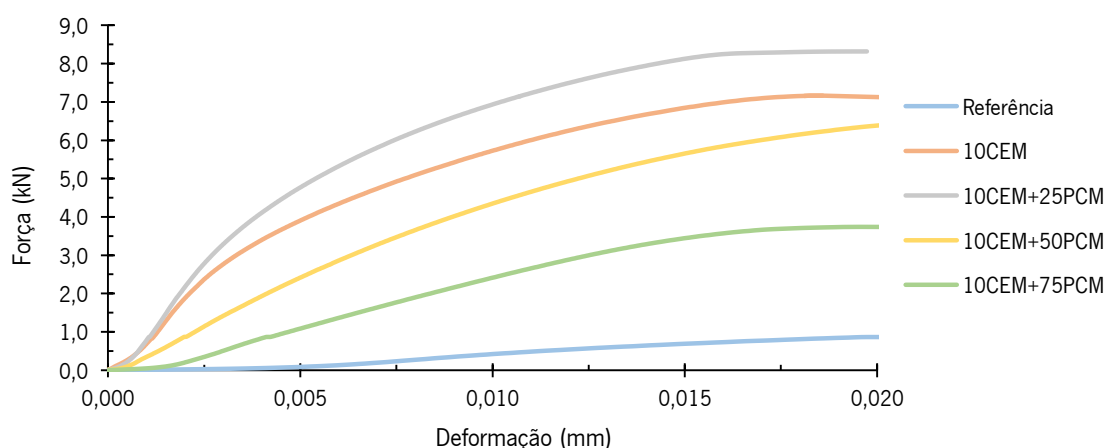


Figura 5.34: Representação das curvas carga-deformação

O cálculo do módulo de elasticidade efetuou-se graficamente com recurso à aproximação da reta à fase linear da curva carga-deformação. Na Tabela 5.12 e Figura 5.35 mostra os valores obtidos do respetivo módulo.

Tabela 5.12: Resultado do módulo de elasticidade dos BTC's

Mistura	Módulo de elasticidade (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
REFERÊNCIA	211	98	46
10CEM	998	296	30
10CEM 25PCM	1012	108	11
10CEM 50PCM	589	57	10
10CEM 75PCM	281	43	15

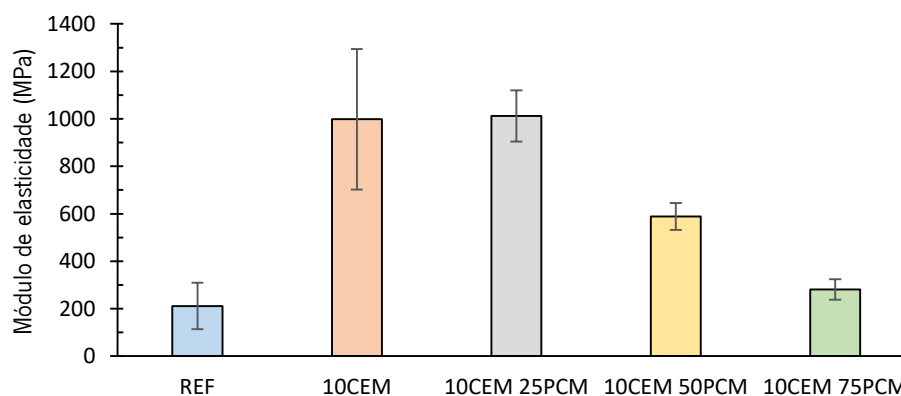


Figura 5.35: Módulo de elasticidade dos BTC's

Em análise aos resultados acima apresentados pode concluir-se que o módulo de elasticidade das diferentes misturas comporta-se de igual modo à resistência à compressão, em que as misturas com 10% de cimento e 10% de cimento com incorporação de 25% de PCM a obterem valores na ordem dos 1000 MPa, enquanto que a mistura de referência e a mistura de 10% de cimento e 75% de PCM atingiram valores na ordem dos 200 MPa e por fim a mistura de 10% de cimento e 50% de PCM com o módulo de elasticidade situado nos 589 MPa. Com estes resultados findar que a incorporação de cimento e a incorporação de PCM em baixas quantidades são benéficas para a rigidez, enquanto que para concentrações de PCM mais elevadas reduz o módulo de elasticidade.

5.9.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade

A absorção por capilaridade é um dos principais mecanismos utilizados pela água para penetrar nos blocos, pois para condições normais de utilização, os BTC's apresentam um baixo teor de humidade, logo a sucção capilar é maior. Os fenómenos de absorção são causados pela chuva de modo cíclico ou pela ascensão capilar da água do solo.

Este ensaio mede a capacidade de absorção de água através dos vasos capilares existentes no interior dos BTC's, fenómeno que acontece devido à diferença de pressão entre a superfície livre de água em contacto com o bloco e a superfície de água no interior dos vasos capilares [77].

No presente ensaio testaram-se dois provetes por cada mistura realizada, seguindo a especificação do LNEC E393 de 1993, que enuncia que os blocos devem ser colocados em estufa à temperatura de $40 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 14 dias para atingirem a massa constante. Posteriormente, quando retirados da estufa são colocados à temperatura ambiente e pesados quando a temperatura estabilizar. De seguida, colocam-se os BTC's dentro de um recipiente sob uma rede para que a face inferior do BTC não entrar em contacto direto com as paredes do recipiente, mas sim com a água. Posto isto,

enche-se o recipiente com água até que o nível atinja $5 + 1\text{mm}$ acima da face inferior do BTC. Por fim, registam-se as massas dos provetes húmidos, espaçadas por diferentes tempos, nomeadamente 0 – 10 – 20 – 30 – 60 – 90 – 120 minutos e de hora a hora até perfazer 8 horas no primeiro dia, e nos restantes dias a várias horas do dia, até que a massa absorvida se estabiliza. Anteriormente à medição da massa, coloca-se o provete numa base não absorvente durante 60 ± 5 segundos e só depois procede-se à pesagem [78].

A Figura 5.36 mostra o procedimento de ensaio enunciado acima.



Figura 5.36: Procedimento de ensaio de absorção de capilaridade: a) e b) BTC's colocados à absorção por capilaridade; c) colocação dos BTC's numa superfície não absorvente; d) pesagem dos BTC's

Para a mistura de referência não foi possível concluir o ensaio, pois o bloco ao longo das pesagens em vez de ganhar massa devido à absorção da água, estava a perder massa devido à desagregação do bloco, como se pode observar na Figura 5.37. As restantes misturas permaneceram intactas sem quaisquer alterações nos BTC's.



Figura 5.37: Ensaio à absorção por capilaridade da mistura de referência: a) ao fim de 60 minutos; b) ao fim de 120 minutos

Depois de efetuadas as medições de todas as misturas, os resultados experimentais obtidos da capilaridade foram calculados pela expressão (5.4), que estabelece a divisão entre o aumento de massa num determinado espaço de tempo pela área do BTC.

$$A_{ci} (g/mm^2) = \frac{M_i - M_0}{A_{BTC}} \quad (5.4)$$

O comportamento de absorção de água por capilaridade (Figura 5.38) é representado por um gráfico com duas fases distintas: a primeira fase é referente ao mecanismo de transporte em materiais porosos, na qual, a penetração depende da taxa de absorção da superfície em contacto com a água. Este troço é definido até que haja uma alteração brusca do andamento do gráfico, onde o declive da reta tangente passa a ser menos acentuado, refletindo o cessar da absorção rápida e iniciando-se a absorção lenta na qual o mecanismo de transporte de água ocorre por difusão [79].

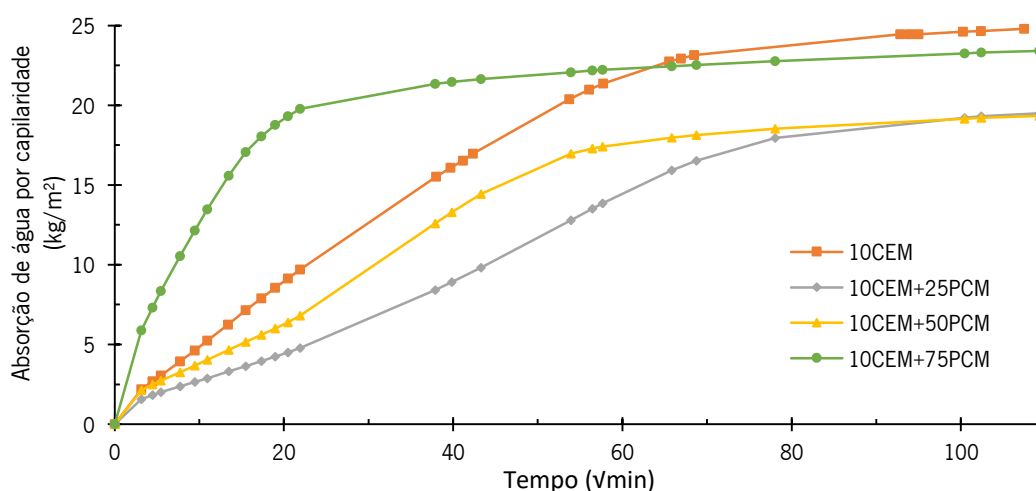


Figura 5.38: Resultados do comportamento da absorção de água por capilaridade

Como se pode constatar o traçado da Figura 5.38, confirma a ocorrência de dois troços distintos no processo de absorção, em que a altura da ascensão capilar foi mais rápida para a mistura de 10% de cimento e 75% de PCM, e o oposto para a mistura de 10% de cimento e 25% de PCM. A mistura 10% cimento apresenta uma absorção por capilaridade linear na fase de absorção rápida, e também a que apresenta uma maior absorção de água no global. As misturas 10% de cimento e 25% de PCM e 10% de cimento e 50% de PCM apresentam uma menor absorção de água no global quando comparadas com as restantes misturas.

Mediante a Figura 5.38, obtém-se o coeficiente de absorção, sendo este determinado na fase de absorção rápida de água capilar através de uma regressão linear, como se pode observar na Figura 5.39 e consultar os resultados na Tabela 5.13 e na Figura 5.40.

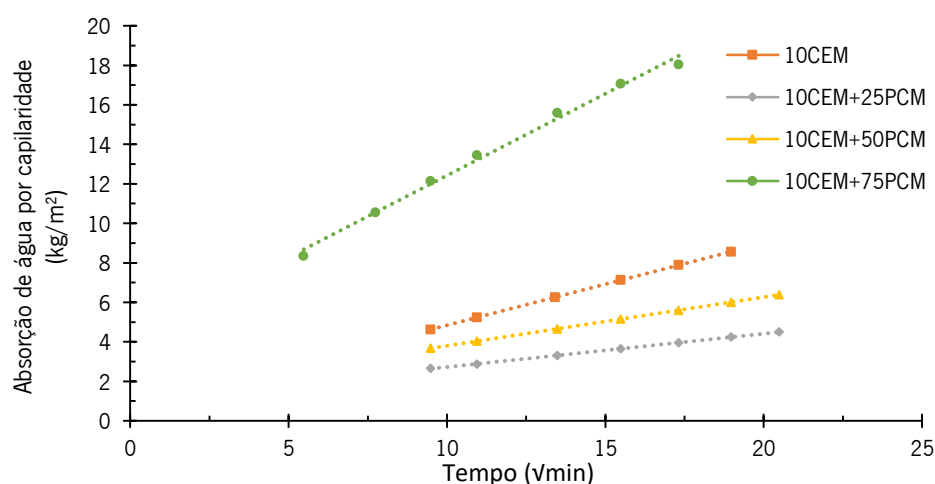


Figura 5.39: Regressão linear da absorção de água por capilaridade

Tabela 5.13: Resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade

Mistura	Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m²)
REFERÊNCIA	-
10CEM	0,4153
10CEM+25PCM	0,1686
10CEM+50PCM	0,2463
10CEM+75PCM	0,8279

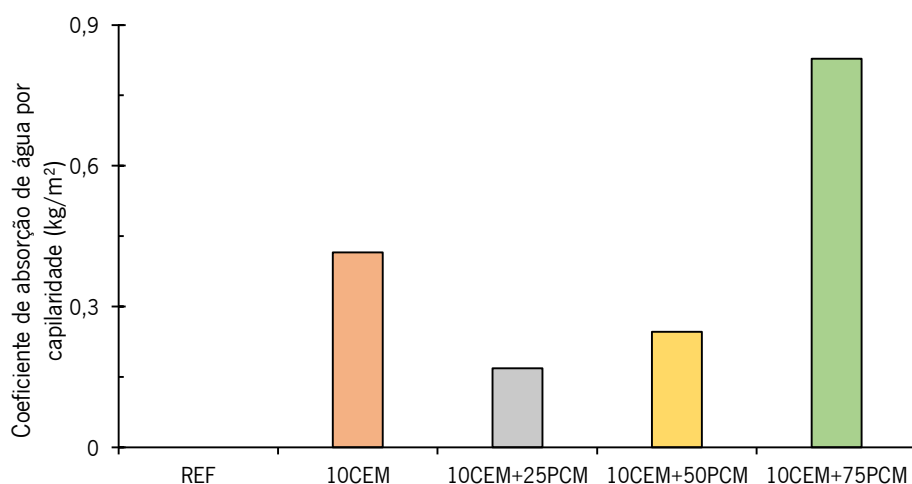


Figura 5.40: Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Em análise aos resultados acima pode-se concluir que o PCM em pequenas quantidades é benéfico para a absorção à capilaridade quando comparado com o bloco de 10% de cimento, devendo-se ao facto da diminuição do número de poros. Para percentagens de PCM elevadas verifica-se totalmente o oposto pois o coeficiente de absorção da mistura 10% de cimento e 75% é cerca de 5 vezes superior ao da mistura 10% de cimento e 25%.

Por último, fazendo uma comparação entre a resistência à compressão e o coeficiente de absorção de água por capilaridade das diferentes misturas (Figura 5.41), pode-se afirmar que esta segue uma relação aproximadamente linear, em que quanto maior a resistência à compressão menor o coeficiente de absorção, ou seja quanto maior a resistência à compressão maior é a durabilidade dos BTC's compostos por PCM.

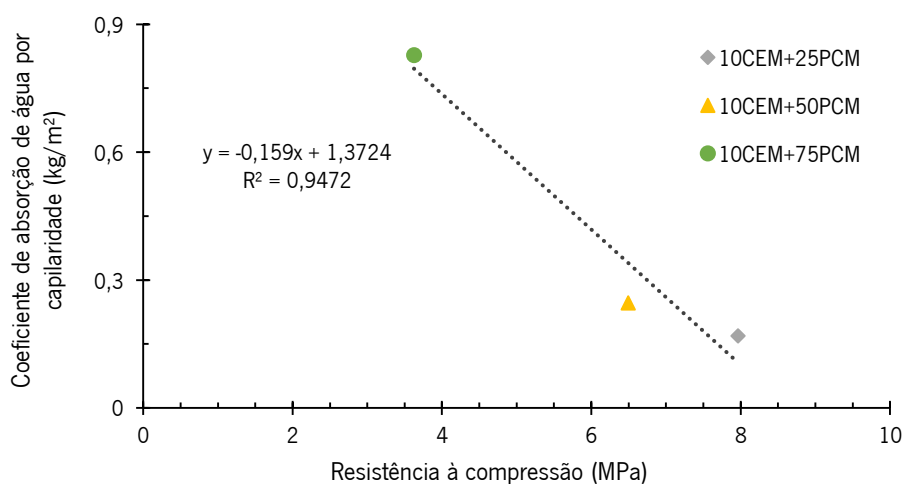


Figura 5.41: Comparação entre a resistência à compressão e o coeficiente de absorção de água por capilaridade

5.9.4 Ensaio de absorção de água por imersão

Uma outra forma de absorção de água nos BTC's deriva da sua imersão. O ensaio em causa permite a quantificação do volume de vazios acessíveis no BTC quando submetido a este ensaio.

No presente ensaio testaram-se um BTC por cada mistura realizada, seguindo a especificação do LNEC E-394, em que primeiramente coloca-se os provetes num recipiente com água de modo a que estes fiquem submersos em 1/3 da sua altura, durante um período de uma hora. De seguida repete-se o processo adicionando água ao recipiente até perfazer 2/3 e a totalidade da altura dos provetes, ambos em períodos de uma hora. Posto isto, aguarda-se até que os provetes atinjam massa constante, em que esta é considerada quando a diferença entre as massas obtidas entre duas pesagens consecutivas intervaladas de 24 horas foi inferior a 0,1%, e de seguida registam-se as massas do provete saturado - M_1 e a hidrostática - M_2 . Por fim procede-se à secagem do BTC em estufa ventilada à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante como referido acima e regista-se a massa do provete seco - M_3 [80].

A Figura 5.42 mostra o procedimento de ensaio referido acima.



Figura 5.42: Procedimento do ensaio de absorção de água por imersão: a) imersão dos BTC's; b) pesagem do provete saturado; c) pesagem hidrostática

De referir que como no ensaio anterior, para mistura de referência não foi possível concluir o ensaio, visto que na imersão do BTC na água, este começou a perder massa devido à desagregação do bloco, até ao ponto do desmoronamento ao fim de duas horas (Figura 5.43). Para as restantes misturas, os BTC's mantiveram-se intactos sem apresentar alterações a nível geométrico e visual.

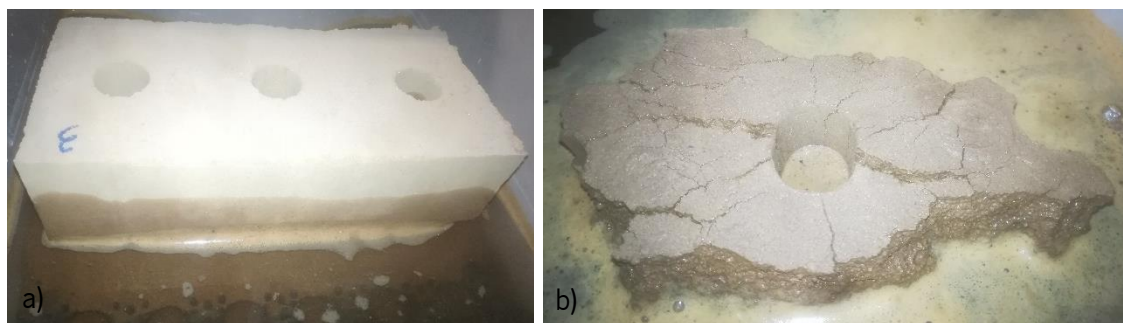


Figura 5.43: Ensaio à absorção por imersão da mistura de referência: a) ao fim de 60 minutos; b) ao fim de 120 minutos

Após todas as tarefas efetuadas procedeu-se ao tratamento dos valores, em que foi possível analisar os resultados obtidos da absorção de água por imersão dos BTC's determinados a partir da equação (5.5) calculada em função da massa do provete saturado em água (M_1), massa hidrostática (M_2) e massa do provete seco (M_3)

$$A_i(\%) = \frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} \times 100 \quad (5.5)$$

Por fim, a absorção de água por imersão obteve-se por percentagem de massa, tal como indicado na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Resultados da absorção de água por imersão

Mistura	Absorção de água por imersão (%)
REFERÊNCIA	-
10CEM	28,11
10CEM+25PCM	21,45
10CEM+50PCM	23,82
10CEM+75PCM	26,72

Após os valores adquiridos na Tabela 5.14 procedeu-se a construção da variação desses valores ilustrados na Figura 5.44.

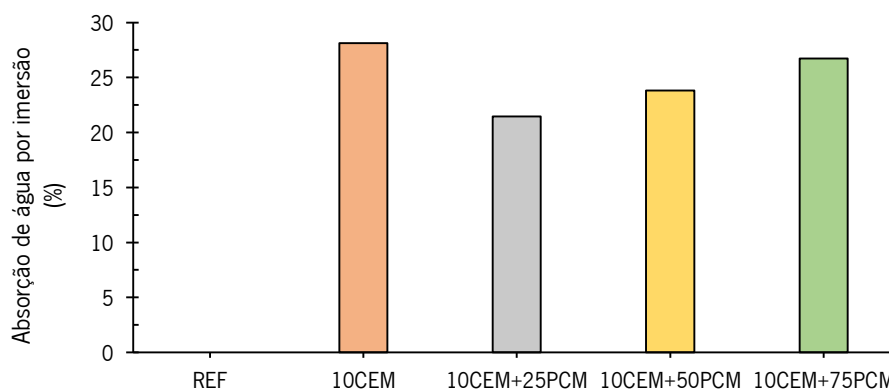


Figura 5.44: Valores da absorção de água por imersão

Em análise aos resultados da absorção de água por imersão pode-se concluir que o PCM é benéfico para concentrações baixas relativamente à mistura de 10% de cimento. Com o aumento da quantidade de PCM nas misturas é notável um aumento da absorção de água por imersão nos provetes. Esta causa pode-se dever a uma má ligação entre o solo, o ligante e o PCM, o que resulta num aumento de vazios.

Por último, fazendo uma comparação entre a resistência à compressão e a absorção de água por imersão das diferentes misturas (Figura 5.45), pode-se afirmar que quanto maior a resistência à compressão menor o coeficiente de absorção, ou seja quanto maior a resistência à compressão maior é a durabilidade dos BTC's compostos por PCM.

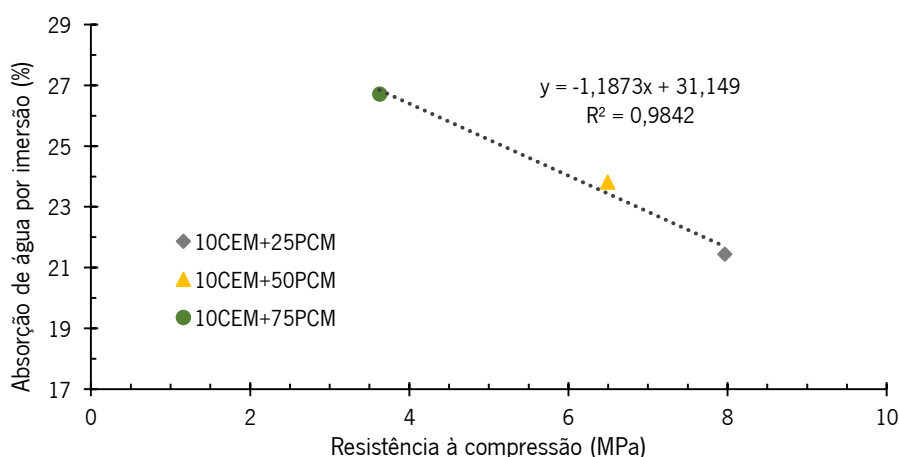


Figura 5.45: Comparação entre a resistência à compressão e a absorção de água por imersão

5.9.5 Ensaio da erosão à chuva

O ensaio da erosão à chuva tem como objetivo avaliar o comportamento dos BTC's em relação à degradação originada pela queda de água sobre as faces do mesmo, determinando assim o desgaste por erosão.

Para a execução do ensaio testaram-se dois BTC's por cada mistura realizada, seguindo a metodologia proposta por Rezende, em que avalia a erosão pluvial ocorrida em alvenarias exteriores durante 50 anos de exposição, considerando os parâmetros climatológicos mais agressivos de Portugal (região de Penhas Douradas).

A realização do ensaio consiste em primeiramente colocar os provetes em estufa à temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ até atingirem a massa constante. De seguida pesa-se o BTC e coloca-se sob a rede metálica do simulador de chuva (anexo 4), e processa-se à simulação da queda da chuva expondo os blocos durante 120 minutos a um jato de água cónico com um caudal de 14,26 l/min a uma pressão de saída de 45 kPa [81].

O procedimento do presente ensaio é ilustrado na Figura 5.46.

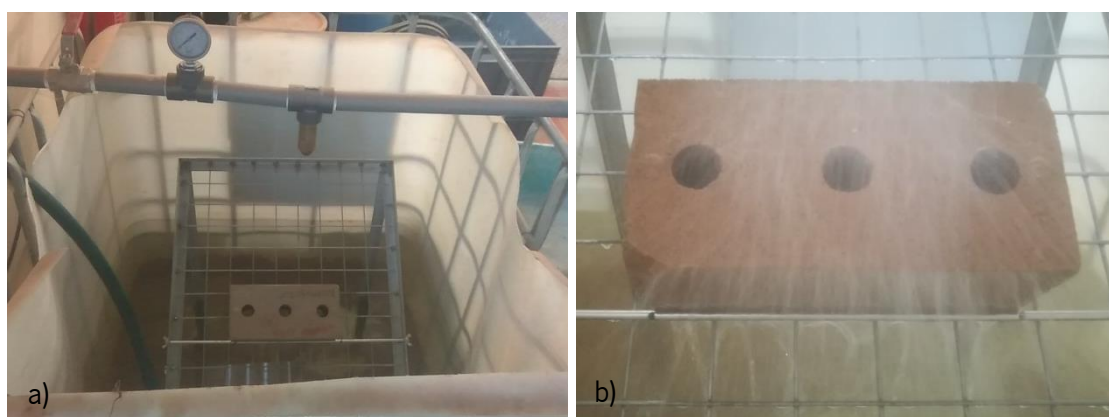


Figura 5.46: Procedimento de ensaio da erosão à chuva: a) BTC pronta a ser ensaiado; b) BTC a ser ensaiado

Após o ensaio coloca-se o BTC numa superfície não absorvente durante 30 minutos, para de seguida registar a massa húmida. Por fim, coloca-se novamente o BTC na estufa à temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ até atingir a massa constante e regista-se a sua massa seca. Este processo é repetido três vezes para cada BTC ensaiado de modo a criar três ciclos de ensaio.

Como ocorrido nos ensaios anteriores, para a mistura de referência não foi possível concluir o ensaio, visto que o BTC em contacto com a água ejetada pelo jato começa a desagregar-se ao fim de poucos minutos como se pode observar na Figura 5.47.

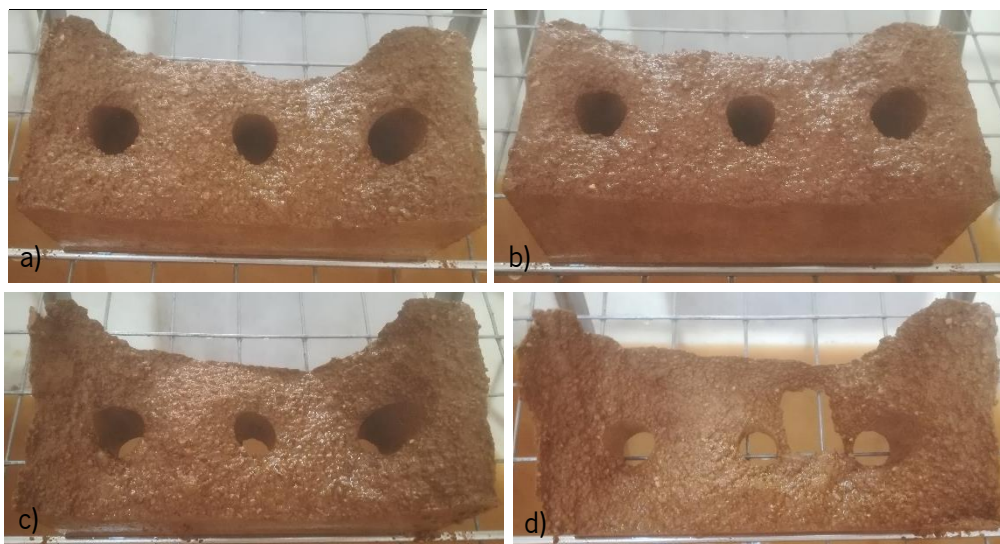


Figura 5.47: Ensaio à erosão da chuva da mistura de referência ao fim de: a) 5 minutos; b) 10 minutos; c) 15 minutos; d) 20 minutos

Observando a Figura 5.48 pode-se analisar o aspeto visual no final dos três ciclos para as restantes quatro misturas, e pode-se concluir que para a mistura de 10% de cimento e para a de 10% de cimento com 25% de PCM o desgaste devido à erosão visualmente é muito baixo ou nulo, enquanto que para as misturas com incorporação de 50 e 75% de PCM o desgaste já é mais visível sobretudo na última mistura.

Para a determinação do desgaste de erosão e da absorção pela chuva recorre-se às massas previamente registadas, em que a diferença entre as massas secas é considerada como desgaste à erosão e a diferença entre a massa seca e a massa húmida como absorção pela chuva, como se pode observar nas equações (5.6) e (5.7) respetivamente.

$$D_e (\%) = (m_{si} - m_{sf}) \times m_{si}^{-1} \times 100 \quad (5.6)$$

$$Ab_{ch} (\%) = (m_u - m_{sf}) \times m_u^{-1} \times 100 \quad (5.7)$$

Por fim, o desgaste por erosão da chuva e a absorção média por chuvas obtiveram os resultados percentuais da

.

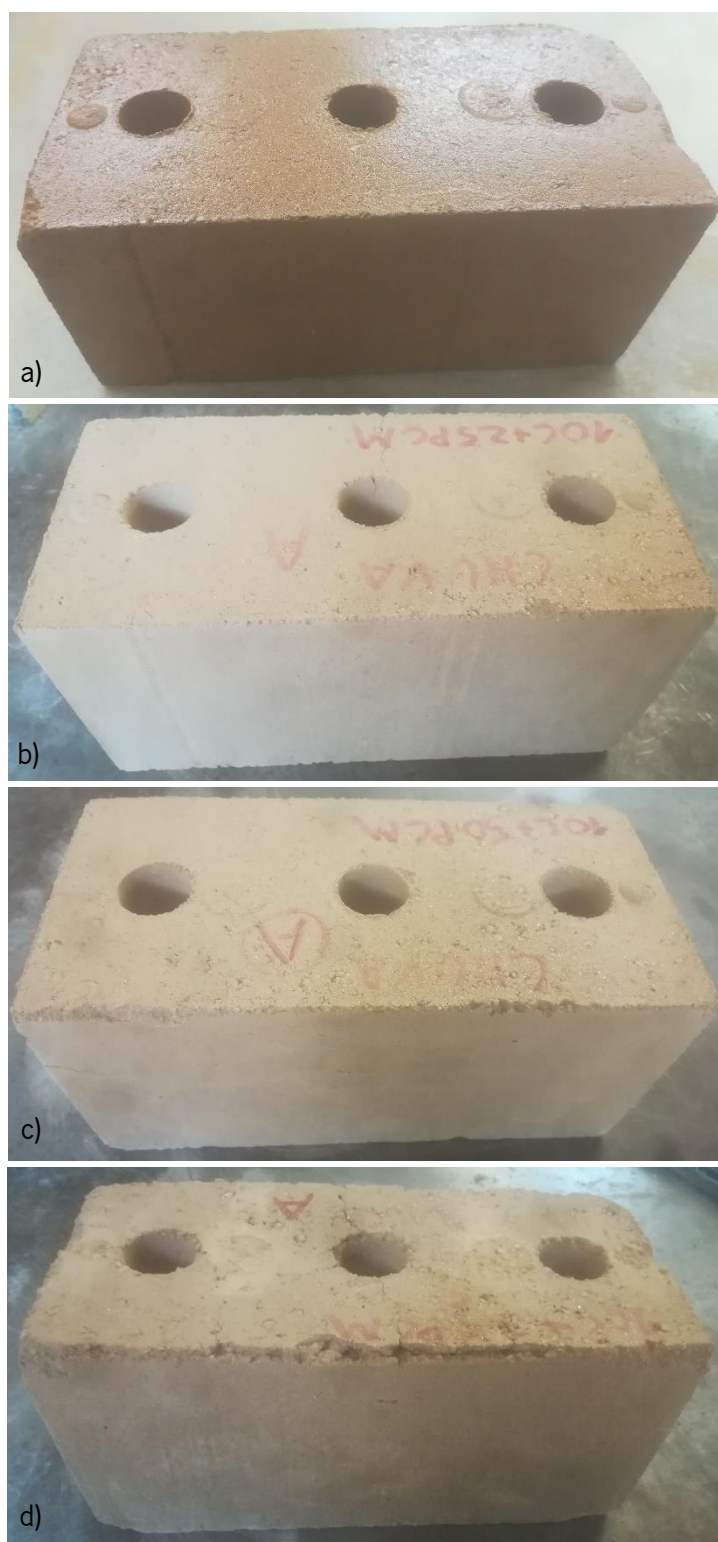


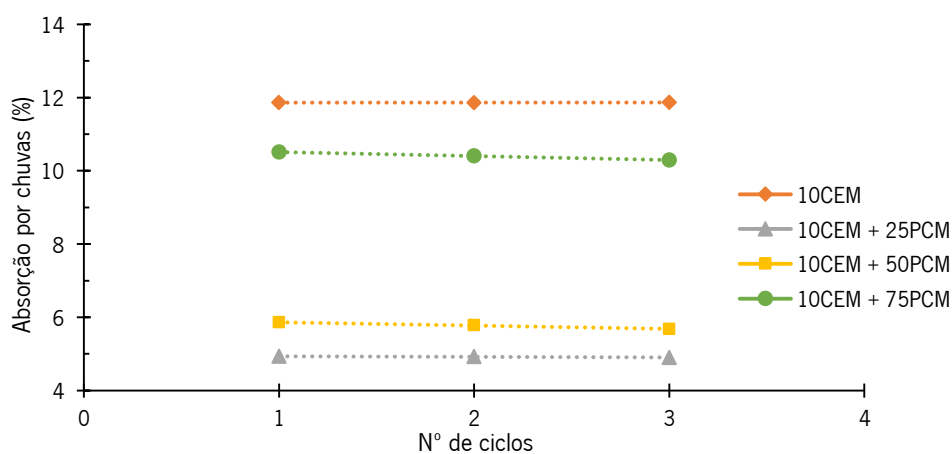
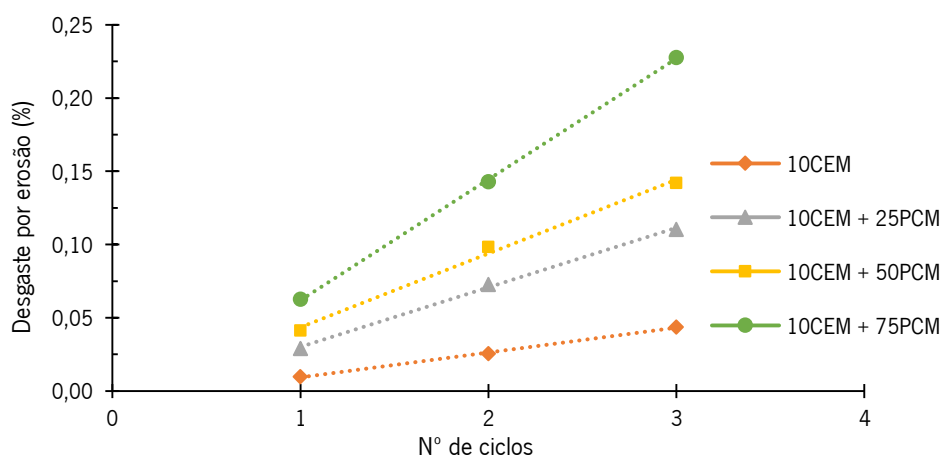
Figura 5.48: Desgaste devido à erosão à chuva ao fim dos três ciclos das diferentes misturas: a) 10% cimento; b) 10% cimento+25%PCM; c) 10% cimento+50%PCM; d) 10% cimento+75%PCM

Tabela 5.15: Resultados do desgaste por erosão e a absorção por chuvas

Mistura	Desgaste por erosão acumulado (%)	Absorção média por chuvas (%)
REFERÊNCIA	-	-
10CEM	0,044	11,86
10CEM+25PCM	0,110	4,92
10CEM+50PCM	0,142	5,77
10CEM+75PCM	0,228	10,40

Após os valores adquiridos na

procedeu-se a construção da variação desses valores ilustrados nas Figura 5.49 e Figura 5.50.



Em análise aos resultados do desgaste por erosão (Figura 5.49) pode-se concluir que a mistura sem incorporação de PCM é a que perde menos massa, e à medida que se aumenta a quantidade

de PCM nas misturas os BTC's vão perdendo cada vez mais massa. Esta causa pode-se dever a uma má ligação entre o solo, o ligante e o PCM, em que é mais gravosa para concentrações de PCM elevadas.

Relativamente à absorção por chuvas (Figura 5.50) é de notar que para concentrações baixas de PCM a absorção por chuvas é mínima, mas com o aumento da quantidade de PCM a absorção tende a aumentar drasticamente. O mesmo também se verifica para a mistura sem PCM, em que esta causa pode-se dever a uma má ligação entre o solo, o ligante e o PCM, o que resulta num aumento de vazios

Por último, fazendo uma confrontação entre a resistência à compressão e o desgaste à erosão das diferentes misturas com incorporação de PCM (Figura 5.51), pode-se afirmar que quanto maior a resistência à compressão menor é o desgaste devido à erosão, ou seja quanto maior a resistência à compressão maior é a durabilidade dos BTC's compostos por PCM.

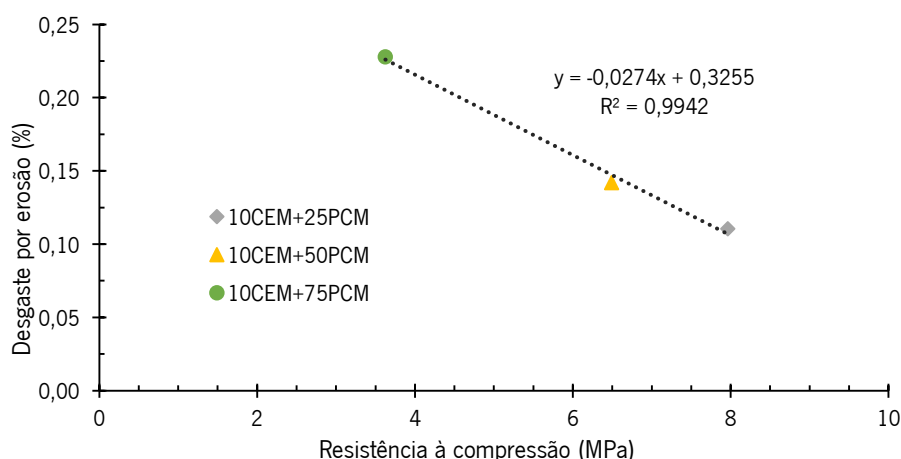


Figura 5.51: Comparação entre a resistência à compressão e o desgaste por erosão

5.9.6 Ensaio à compressão após o ensaio da erosão da chuva

A realização do ensaio segue a norma EN 772-1 de 2002 como descrito em 5.9.1 Ensaio à compressão preliminar.

Para a execução do ensaio utilizaram-se os dois BTC's de cada mistura testados anteriormente no ensaio da erosão à chuva. Este ensaio tem como finalidade avaliar o comportamento mecânico dos BTC's após estes serem expostos num meio agressivo.

As resistências à compressão obtidas nos ensaios aos BTC para as diversas misturas encontram-se descritas na Tabela 5.16 e representadas na Figura 5.52.

Tabela 5.16: Comparação entre as compressões antes e depois do ensaio à chuva

Mistura	Compressão antes do ensaio da erosão à chuva (MPa)	Compressão após o ensaio da erosão à chuva (MPa)	Aumento da compressão (%)
REF	1,1	-	-
10CEM	7,3	8,8	17,0
10CEM 25PCM	8,0	9,5	16,3
10CEM 50PCM	6,5	8,6	24,1
10CEM 75PCM	3,6	6,0	39,6

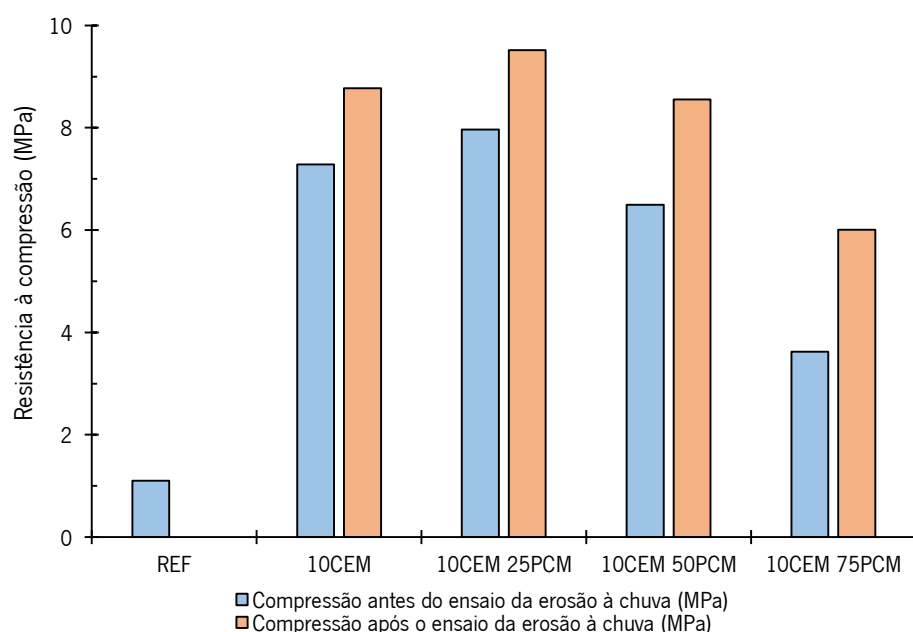


Figura 5.52: Comparação entre as resistências à compressão antes e depois do ensaio à chuva

Em análise aos resultados apresentados acima, pode-se concluir que contrariamente ao expectável, a resistência à compressão aumentou para os BTC testados anteriormente ao ensaio da erosão à chuva. Este aumento deve-se ao facto que durante o ensaio da erosão à chuva, antes de cada ciclo os BTC's foram colocados em estufa, e como o cimento vai ganhando cada vez mais resistência com o passar do tempo, na estufa a 105°C acelerou ainda mais este processo. Pode-se concluir também com o presente ensaio que nas misturas com 10% de cimento e 10% de cimento com 25% de PCM houve um acréscimo de cerca de 17% na resistência à compressão após o ensaio da erosão à chuva e nas restantes misturas com o aumento da quantidade de PCM incorporada na mistura maior é o acréscimo na resistência à compressão, chegando a cerca de 40% de acréscimo.

5.9.7 Ensaio de termogravimetria

A termogravimetria é um ensaio que mede a variação de massa da amostra (perda e/ou ganho) em função da variação de temperatura imposta ao material analisado.

O equipamento utilizado da marca “TROXLER” e modelo “4155B” (Figura 5.53) é composto por uma balança que mede a massa da amostra do início ao fim do ensaio.

Para a realização do ensaio utilizaram-se BTC's das diferentes misturas com 28 dias de cura. Primeiramente pesaram-se os blocos, pois o equipamento mede a perda ou ganho de massa mediante a massa inicial inserida manualmente, e de seguida os BTC's eram colocados no equipamento para serem submetidos no ensaio. De ressaltar que cada bloco das diferentes misturas foi ensaiado em dias diferentes, de modo a que o equipamento tivesse sempre a mesma temperatura inicial, a temperatura ambiente.



Figura 5.53: Procedimento de ensaio da termogravimetria: a) equipamento utilizado; b) BTC depois de ser ensaiado; c) registo dos resultados ao longo do ensaio

Durante o ensaio, como os blocos são expostos a temperaturas elevadas (acima dos 500°C), estes mudam o seu aspeto exterior, nomeadamente a sua cor, como se pode observar na Figura 5.54. Na mesma figura também se pode observar manchas negras nos blocos em que na sua mistura contém PCM. Estas manchas devem-se ao BTC em questão ter entrado em combustão devido à parafina existente no PCM.

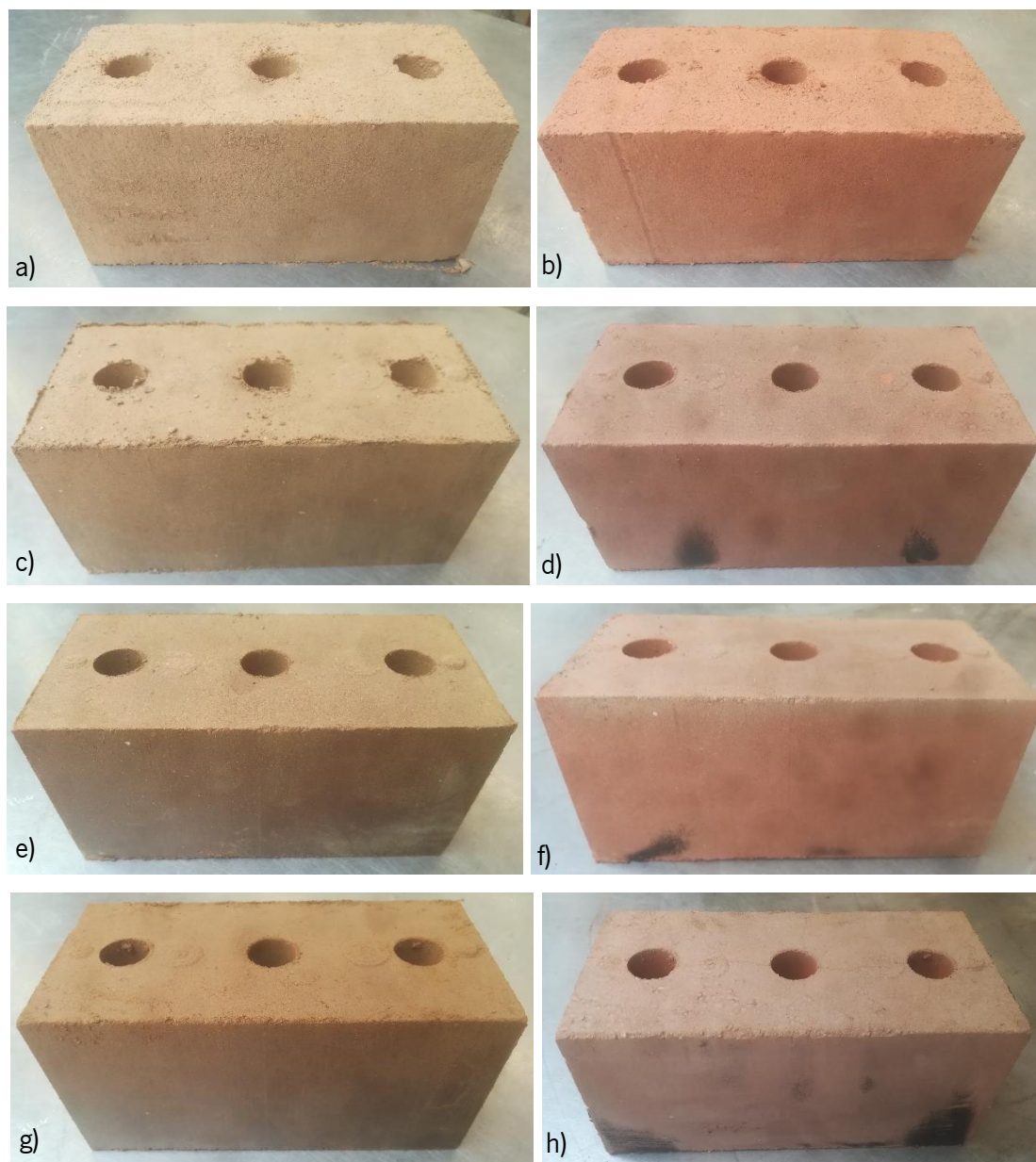


Figura 5.54: Aspeto visual antes e depois do ensaio de termogravimetria: a) e b) mistura de referência; c) e d) mistura 10%CEM + 25%PCM; e) e f) mistura 10%CEM + 50%PCM; g) e h) mistura 10%CEM + 75%PCM

O resultado de um ensaio de termogravimetria é uma curva térmica que representa a variação de massa em função da temperatura, a qual regista os fenómenos energéticos desenvolvidos durante o processo de variação de temperatura imposto à amostra [82]. A primeira derivada da curva acima referida oferece como informação a velocidade da variação da massa em relação à temperatura. O resultado de ambas as curvas referidas anteriormente é apresentado na Figura 5.55.

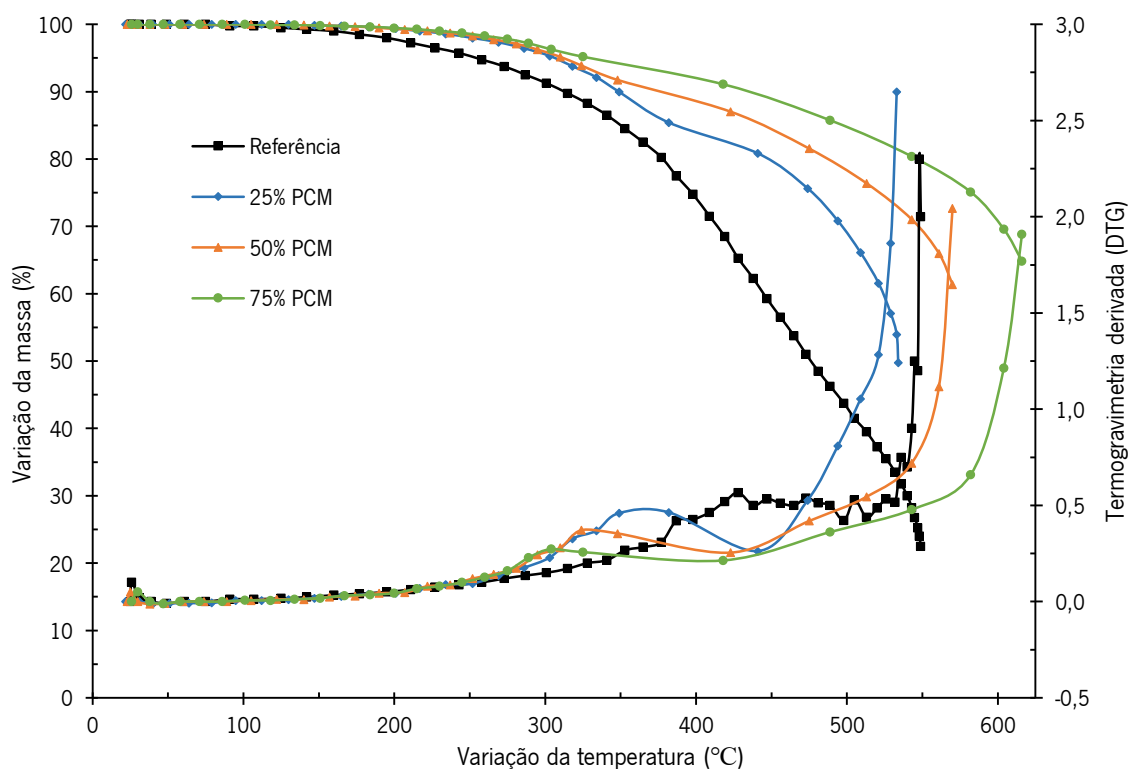


Figura 5.55: Resultado do ensaio de termogravimetria

Em análise à Figura 5.55 pode-se concluir através das curvas de variação de massa que o solo de referência perde mais massa comparado com as restantes misturas com PCM. Observando a DTG, os picos entre os 300 e 400°C nas curvas das misturas que contém PCM devem-se à mudança de fase do PCM, pois segundo o anexo 2 enuncia que o ponto de fusão do PCM é superior a 150°C. Esta passagem do PCM de líquido para vapor ocorre a partir dos 300°C e não a partir dos 150°C pois o PCM está envolvido pela mistura do solo e cimento que retarda o seu ponto de fusão. Neste ponto de fusão também é possível verificar que quanto mais PCM contém a mistura, a mudança de fase do mesmo ocorre a temperaturas mais baixas. No que respeita a mistura de referência os picos são a eliminação de pequenos constituintes do solo, mas são pouco significativos pois nas curvas das misturas com PCM estes picos não se verificam.

5.10 Análise de resultados

Em resumo, pode-se concluir que a mistura 10%CEM + 25%PCM é a que conduz a melhores resultados nos ensaios aos BTC's. Os ensaios realizados a nível mecânico, em que na resistência à compressão esta mistura resiste a 8 MPa, enquanto que a mistura 10%CEM obtém a 7,3 MPa e na mistura 10%CEM + 50%PCM resiste a 6,5 MPa, o que se pode verificar que com um acréscimo de 25% de PCM à mistura 10%CEM há um ligeiro aumento na resistência à compressão, mas depois com o aumento gradual do PCM a resistência à compressão diminui. De igual modo

pode-se verificar no módulo de elasticidade, em que a mistura 10%CEM + 25%PCM obtém 1012 MPa, enquanto que na mistura 10%CEM adquire 998 MPa e a mistura 10%CEM + 50%PCM alcança 589 MPa. Nos ensaios de durabilidade o mesmo se verifica, a mistura 10%CEM + 25%PCM conduz aos melhores resultados em quase todos os campos. No ensaio de absorção por capilaridade a mistura referida tem o menor coeficiente de absorção (0,1689 kg/m²), seguida a mistura 10%CEM + 50%PCM com 0,2463 kg/m². No ensaio de absorção por imersão o mesmo se verifica, pois a mistura 10%CEM + 25%PCM obtém uma absorção de 21,45% e a mistura 10%CEM + 50%PCM 23.82%. No ensaio de erosão por chuva o mesmo não se verifica, pois o desgaste por erosão é menor para a mistura 10%CEM com 0,044% enquanto que a mistura 10%CEM + 25%PCM tem um desgaste de 0,11%. Este desgaste aumenta sucessivamente com o aumento gradual da quantidade de PCM.

A mistura de referência obteve os piores resultados nos ensaios: na compressão obteve 1,1 MPa, o que é inferior à compressão mínima apresentada na Tabela 5.9 e aos tijolos convencionais. Nos ensaios de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e erosão da chuva o BTC desmoronou-se após alguns minutos em contacto com a água, logo pode-se concluir que a mistura de referência é inviável para a construção.

A mistura 10%CEM + 75%PCM apresenta resultados inferiores em todos os ensaios quando comparadas com as restantes misturas que contêm PCM.

Por fim, pode-se verificar que a resistência a compressão está diretamente relacionada com a durabilidade dos BTC's, pois quanto menor o desgaste à erosão, quanto menor a absorção de água por imersão e quanto menor a absorção por capilaridade, maior é a resistência à compressão.

6 Conclusão

6.1 Conclusões gerais

Pelos diversos ensaios laboratoriais pode-se verificar que o solo é composto maioritariamente por areia e uma pequena parte de argila, o que vai de encontro aos resultados dos ensaios à mistura de referência em que os valores da resistência à compressão foram inferiores ao mínimo recomendado e nos ensaios de durabilidade não foram concluídos pois o BTC desmoronou-se em contacto com a água. Este facto deve-se ao solo conter pouca argila na sua constituição, pois esta funciona como ligante.

A utilização do dimensionamento de misturas demonstra que é bastante vantajoso e benéfico no sentido técnico para o fabrico dos BTC, conseguindo um método de cálculo para obter as quantidades necessárias para a produção das composições das misturas dos BTC.

A metodologia adotada para a incorporação do PCM nos BTC é benéfica, pois ao adicionar o PCM e durante a realização da mistura, este não muda de fase para o seu estado sólido.

Neste trabalho verificou-se que à medida que se aumenta a incorporação de PCM nos BTC's a resistência mecânica vai diminuindo, à exceção para pequenas quantidades de PCM que é benéfico para a mistura. A isto, deve-se ao facto do PCM não permitir a hidratação do cimento para grandes quantidades de PCM e dificultar a cura dos BTC's nos 28 dias, ou seja, a incorporação em excesso de PCM na mistura dificulta o contacto do cimento com a água, retardando as reações de endurecimento do cimento, como é comprovado no ensaio à compressão após o ensaio da erosão da chuva em que os blocos foram colocados na estufa a 105°C e a resistência à compressão final foi superior à resistência à compressão inicial, devido ao facto de acelerar as reações de endurecimento do cimento na estufa.

Por fim, pode-se concluir que no global dos ensaios a mistura que apresenta bons resultados quer ao nível mecânico, quer ao nível da durabilidade face à sustentabilidade é a mistura 10%CEM + 50%PCM, pois a resistência à compressão (6,5 MPa) é superior à mínima recomendada e também aos tijolos convencionais, e quanto os ensaios de durabilidade apresenta resultados intermédios face às restantes misturas.

6.2 Investigação futura a desenvolver

A realização da presente dissertação contribuiu para um aumento da potencialidade e desempenho dos BTC's, como soluções construtivas mais sustentáveis e ambientalmente mais limpas. Contudo, o presente estudo é apenas uma pequena abordagem que deve ser complementada com outros trabalhos de investigação que visem um conhecimento mais aprofundado do comportamento deste material de construção. Como tal, para uma maior solidez na utilização de BTC's, como solução construtiva, são sugeridos alguns temas de desenvolvimento futuro:

- Com recurso a ensaios de microscópico eletrónico de varrimento (MEV), verificar a existência ou não de vazios à medida que se vai aumentando a percentagem de PCM na mistura;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos BTC's com incorporação de PCM quando submetidos a diversas temperaturas durante a fase da cura e da realização do ensaio;
- Em laboratório executar paredes em BTC de modo a permitir fazer a divisão entre dois compartimentos para analisar o comportamento térmico entre ambas as faces quando expostas à estação do frio (Inverno) e do calor (Verão).

7 Referências bibliográficas

- [1] R. Rael, "Earth architecture," *Struct. Archit.*, pp. 962–970, 2013.
- [2] M. Blondet, G. Villa Garcia, S. Brzev, and Á. Rubiños, "Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial," *EERI/IAEE World Hous. Encycl.*, vol. 56, no. Second, pp. 13–21, 2011, doi: 10.1227/01.NEU.0000255422.86054.51.
- [3] G. Minke, "Building with Earth Design and technology of a sustainable architecture," *BIRKHAUSER*, p. 198, 2006.
- [4] E. Avrami, H. Guillaud, and M. Hardy, "Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation," *Getty Conserv. Inst.*, p. 174.
- [5] P. Torgal, R. Eires, and S. Jalali, *Construção em Terra*. 2009.
- [6] H. Houben and H. Guillaud, "Traité de construction en terre," *CRATerre*, p. 21, 2006.
- [7] Arcaterrablog, "25-tapial-muralha-da-china," 2012.
- [8] R. Almeida, "Conheça Shibam: a primeira cidade verticalmente planejada da história." [Online]. Available: <https://www.hometeka.com.br/f5/conheca-shibam-a-primeira-cidade-verticalmente-planejada-da-historia/>.
- [9] Wikipédia, "Grande Mesquita de Djenné." [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Grande_Mesquita_de_Djenné.
- [10] M. F. C. G. da Silva, "Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios," *Técnico Lisboa*, p. 130, 2015.
- [11] J. Fernandes, "Mali em Outubro para Conhecer a Mesquita de Djenné," 2018. [Online]. Available: <https://www.girassolviagens.com/mali-em-outubro-mesquita-de-djenne/>.
- [12] M. H. de Araújo, "Comportamento térmico de blocos de terra comprimida ativada alcalinamente," *Univ. do Minho*, p. 120, 2015.
- [13] C. LIECHAVICIUS, "AS PIRÂMIDES DE TEOTIHUACAN." [Online]. Available: <https://www.viajarpelomundo.com/2011/07/as-piramides-de-teotihuacan.html>.
- [14] Tiago Martins, "INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE EM BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA," *Univ. do Minho*, p. 107, 2018.
- [15] Wikipédia, "Castelo de Paderne." [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Castelo_de_Paderne.
- [16] Wikipédia, "Castelo de Silves." [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Castelo_de_Silves.
- [17] S. R. Duarte, "Construir com a terra. Uma proposta de intervenção no Bairro do Barruncho, Odivelas," *Univ. Técnica Lisboa*, p. 244, 2013.
- [18] J. Monge, "Construção em Terra," *ECOCASA PORTUGUESA*, 2016. [Online]. Available: <http://ecocasaportuguesa.blogspot.com/2016/06/construcao-em-terra.html>.

- [19] A. M. Moreira, “Materiais de Construção I - Terra Crua,” *Inst. Politécnico Tomar*, p. 23, 2008.
- [20] M. I. da S. Gomes, “Conservação de construções de taipa : argamassas de reparação,” *Univ. Nov. Lisboa*, p. 357, 2013.
- [21] V. F. C. Lopes, “Estudo da viabilidade da incorporação de resíduo de sisal em BTC,” *Univ. Aveiro*, p. 100, 2012.
- [22] J. A. Charles, “Ground improvement: The interaction of engineering science and experience-based technology,” *Geotechnique*, vol. 52, no. 7, pp. 527–532, 2002, doi: 10.1680/geot.2002.52.7.527.
- [23] V. Rigassi, *Compressed Earth Blocks : Manual of Production*, vol. I. 1995.
- [24] M. A. B. Carvalho, “Desenvolvimento e validação de uma solução construtiva em BTC,” *Univ. do Minho*, p. 116, 2015.
- [25] S. Torgal, F. P. e Jalali, “O renascimento da construção com alvenaria de terra,” *Revista Maquinaria, Angola*, vol. 216. pp. 80–89, 2011.
- [26] D. V Oliveira and T. Miranda, “CARATERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO CORTE DE ALVENARIA DE BLOCOS DE TERRA COMPACTADA COM JUNTA SECA,” *9º Congr. Nac. Mecânica Exp.*, no. October, 2014.
- [27] C. de C. Ferreira, ““A Sustentabilidade Do Sistema Construtivo Em Terra: Um Projecto De Reabilitação,”” *Univ. DA BEIRA Inter.*, p. 99, 2012.
- [28] C. M. Oliveira Brasil, “ESTUDO DAS CONSTRUÇÕES TRADICIONAIS EM ADOBE NA REGIÃO,” *Inst. Politécnico Tomar*, p. 117, 2016.
- [29] R. M. V. Domingues, “Avaliação do potencial económico de implementação da construção em BTC,” *Univ. do Minho*, p. 136, 2015.
- [30] Aldeias de Pedra, “CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO DE TABIQUES E GAIOLA POMBALINA.” [Online]. Available: http://www.aldeiasdepedra.pt/servicos/construcao_reabilitacao_tabiques_gaiola_Pombalina.asp.
- [31] L. C. Picorelli, “Construção de terra: Parte2 - Adobe,” *Bioarquitetura e Bioconstrução*, 2011. [Online]. Available: <http://lecympicorelli-bioarquitetura.blogspot.com/2011/06/construcao-de-terra-parte2-adobe.html#axzz6JEIVky7z>.
- [32] INSTITUTO TIBÁ, “ABÓBADA.” [Online]. Available: <https://www.tibario.com/abobada>.
- [33] S. Bestraten, E. Hormías, and A. Altemir, “Construcción con tierra en el siglo XXI,” *Inf. la Constr.*, vol. 63, no. 523, pp. 5–20, 2011, doi: 10.3989/ic.10.046.
- [34] J. M. Falcão, “Arquitetura Contemporânea em Terra,” *Técnico Lisboa*, p. 221, 2014.
- [35] J. V. Oliveira, “Comportamento mecânico de blocos de terra compactada ativados alcalinamente,” *Univ. do Minho*, p. 173, 2014.
- [36] Horst Schroeder, “The New DIN Standards in Earth Building—The Current

- Situation in Germany,” *J. Civ. Eng. Archit.*, vol. 12, no. 2, pp. 113–120, 2018, doi: 10.17265/1934-7359/2018.02.005.
- [37] M. Rocha, “Dossier BTC - Vale das Lobas,” *CEDACTerra*, p. 41, 2017.
- [38] A. M. F. Ribeiro, “Análise experimental do comportamento ao corte de paredes reforçadas em alvenaria de BTC,” *Univ. do Minho*, p. 205, 2015.
- [39] K. Katrini, “FACES DA ARQUITETURA,” 2012. [Online]. Available: <http://facesdaarquitectura.blogspot.com/2012/03/o-que-e-arquitetura-sustentavel.html>.
- [40] D. P. De Lima, “Ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário em Bloco de Terra Compactada (BTC),” *Inst. Politécnico Bragança*, p. 117, 2017.
- [41] S. Torgal, F.; Jalali, “Considerações sobre a Sustentabilidade dos Materiais de Construção,” *C. Mater.*, p. 462, 2010.
- [42] “Tijecom.” [Online]. Available: <https://www.billysell.com/promosion?lightbox=datapitem-jc8qh5so>.
- [43] J. M. Chumbinho, “Otimização de solos para a produção de blocos de terra compactada,” *Univ. Évora*, p. 156, 2017.
- [44] “TIJOLOS ECOLÓGICOS EM SOLO CIMENTO.” [Online]. Available: <http://ecoblocos.no.comunidades.net/tijolos-ecologicos-em-solo-cimento>.
- [45] Adam, Ea, Agib, and Ara, “Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan,” *UNESCO*, p. 101, 2001.
- [46] K. Telfeyan, “School of science and engineering,” *AL AKHAWAYN Univ.*, no. October, p. 57, 2015.
- [47] P. de J. S. P. da Silva Grade, “Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos,” *Inst. Super. Eng. LISBOA*, p. 132, 2013.
- [48] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, and A. Tadeu, “Argamassas Térmicas com incorporação de Materiais de Mudança de Fase,” *Assoc. Port. dos Comer. dos Mater. Construção*, p. 4, 2016.
- [49] I. A. C. Grilo, “Estudo de Revestimentos Ativos para o Isolamento Térmico de Edifícios,” *Univ. do Minho*, p. 95, 2015.
- [50] L. S. De Oliveira and J. A. Azambuja, “Materiais de Mudança de Fase,” *XI Sem. Extensão, Pesqui. e Pós-Graduação - SEPesq Cent. Univ. Ritter dos Reis*, p. 11, 2015.
- [51] S. P. L. Costa, “Armazenamento de Energia Térmica Através de Materiais de Mudança de Fase,” *Fac. Eng. da Univ. do Porto*, p. 162, 2014.
- [52] J. M. Monteiro, J. B. de Aguiar, L. Bragança, J. R. Gomes, and P. Santos, “Argamassas com Desempenho Térmico Melhorado,” *Congr. Nac. Argamassas Construção*, p. 12, 2005.
- [53] B. F. M. Martins, “Materiais de Mudança de Fase (PCM) para Melhoria do Desempenho Térmico de Edifícios,” *Fac. Eng. da Univ. do Porto*, p. 115, 2017.
- [54] P. M. T. Roque, “Utilização de materiais de mudança de fase na melhoria do

- comportamento térmico de edifícios,” *Univ. Aveiro*, p. 149, 2015.
- [55] V. Pons and G. Stanescu, “Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil,” *PARC Pesqui. em Arquitetura e Construção*, vol. 8, no. 2, p. 127, 2017, doi: 10.20396/parc.v8i2.8650228.
- [56] N. T. D. F. da Silva, “Incorporação de Materiais de Mudança de Fase em Materiais de Construção,” *Univ. do Minho*, pp. 1–217, 2009.
- [57] “Rubitherm Technologies.” [Online]. Available: <https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/makroverkaspelung-kuhlakkus>.
- [58] P. J. S. Tristão, “Encapsulação de materiais de mudança de fase (PCM) para aplicações no armazenamento de energia,” *Inst. Politécnico Bragança*, p. 141, 2014.
- [59] V. D. L. Martins, “Argamassas Sustentáveis de Baixa Retração,” *Univ. do Minho*, p. 91, 2012.
- [60] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “Especificação LNEC E 199 (1967) - Ensaio de equivalente de areia.” p. 3, 1967.
- [61] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “Especificação LNEC E 196 (1966) - Análise granulométrica.” p. 9, 1966.
- [62] P. Walker, “HB 195 - The Australian earth building handbook,” *Stand. Aust.*
- [63] A. Viana da Fonseca, “Geomecânica dos solos residuais do granito do Porto. Critérios para dimensionamento de fundações directas,” *Fac. Eng. da Univ. do Porto*, p. 841, 1996.
- [64] D. V Oliveira, T. Miranda, and E. Soares, “Mechanical Behaviour of Compressed Earth Blocks Stabilised,” no. April, p. 17, 2014.
- [65] UNE 41410, “Bloques de tierra comprimida para muros y taboques/Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo,” *AENOR*, p. 28, 2008, doi: M 55496:2008.
- [66] N. Araújo, “Manual da Unidade Curricular de Geologia,” *Univ. do Minho*, p. 235, 2017.
- [67] *NP 143: Solos. Determinação de limites de consistência*. 1969.
- [68] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “Especificação LNEC E 197 (1966) - Ensaio de Compactação.” p. 8, 1966.
- [69] A. F. de Normalization, “NF P 94-068: Medição da quantidade e da actividade de fração argilosa.” p. 11, 1993.
- [70] “NP 83 1965: Densidade das partículas-peso específico.” p. 4, 1965.
- [71] A. S. de Deus, “CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA DE SOLOS EM ÁREAS AGRÍCOLAS COM POTENCIAL PARA IRRIGAÇÃO NAS REGIÕES DO AGRESTE E MATA PARAIBANA,” *Univ. Fed. DA PARAÍBA*, p. 56, 2017, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [72] SECIL, “CIMENTO ALTO DESEMPENHO: CEM I.” [Online]. Available: https://secilpro.com/produtos/nossos_produtos/cimento/cimento-alto-

desempenho-cem-i/supratek-cem-i-425r.

- [73] RUBITHERM, “SÉRIE PCM RT.” [Online]. Available: <https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/organische-pcm-rt>.
- [74] D. Ribeiro, V. Silva, and P. Faria, “Caracterização de blocos de terra comprimida,” *1º Congr. Ensaios e Exp. em Eng. Civ.*, pp. 1–8, 2016.
- [75] NP EN 772-1, “NP EN 772-1 (2002)-Determinação da resistência à compressão.” p. 14, 2002.
- [76] “Grupo Preceram.” [Online]. Available: <https://preceram.pt/tradicional/>.
- [77] J. C. Morel, A. Pkla, and P. Walker, “Compressive strength testing of compressed earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 2, pp. 303–309, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021.
- [78] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “Especificação LNEC E 393 - Determinação da absorção de água por capilaridade.” p. 2, 1993.
- [79] L. S. N. Páscoa, “Índice de secagem com o parâmetro em serviço dos rebocos aplicados em parede exteriores,” *Técnico Lisboa*, p. 136, 2012.
- [80] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “Especificação LNEC E 394 - Determinação da absorção de água por imersão.” p. 2, 1993.
- [81] M. Rezende, R. Eires, A. Camões, and C. de Jesus, “Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuvas para teste acelerado de degradação,” *Eng. Civ. da Univ. do Minho*, pp. 17–28, 2016.
- [82] “Instituto Pedro Nunes.” [Online]. Available: <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/2>.
- [83] Wikipédia, “Craterre.” [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Craterre>.
- [84] T. B. D. Durães, “Identificação do Tipo e Quantidade de PCM Adequado ao Clima Português - LISBOA,” *Univ. do Minho*, p. 91, 2013.

ANEXOS

8.1 ANEXO 1: Ficha técnica do cimento CEM I 42,5R

SUPRATEK
CEM I 42,5R
CIMENTO PORTLAND

Locais de Produção
Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem
Granel
Sacos de 25kg

Certificação
Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificado de Regularidade do Desempenho e Declaração
de Desempenho 0856-CPR-0118 (Secil-Outão) e 0856-CPR-0124 (Maceira-Liz)



Composição do Produto (Núcleo Cimento)	95% a 100% Clínquer Portland 0% a 5% Outros Constituintes
Principais Características	Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação. Desenvolvimento rápido da resistência (resistências iniciais elevadas). Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).
Principais Aplicações	O Cimento Portland Branco CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação. As principais aplicações deste cimento são: <ul style="list-style-type: none">• betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;• betões leves de elevada resistência;• betão com aplicação de pré-esforço a idade jovens;• betão aplicado em tempo frio;• prefabricação ligeira pré-esforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;• caldas de selagem e injeção.
Advertências Específicas	O correto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura. <ul style="list-style-type: none">• devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;• devem evitar-se betonagens em tempo muito quente. <p>Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance. A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.</p>
Informação de Segurança	O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras, de óculos para proteção dos olhos e luvas e fato de trabalho para proteção das mãos e pele. Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança.



CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	$\leq 5,0\%$
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	$\leq 5,0\%$
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	$\leq 4,0\%$
Teor de Cloretos	NP EN 196-2	$\leq 0,10\%$

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

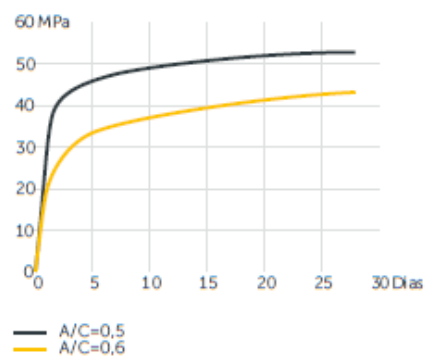
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Resistência à Compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias	Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias
≥ 20	-	$\geq 42,5$ e $\leq 62,5$

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Direção Executiva Portugal Cimentos
Av. Eng.º Duarte Pacheco
19, 7º, 1070-100 Lisboa

Tel - 2179 27100

Direção Nacional de Vendas
Tel - 217 927 100

Vendas Norte
Tel - 226 078 410

Vendas Centro
Tel - 244 779 500

Vendas Sul
Tel - 212 198 280

Vendas Técnicas
Tel - 212 198 280

Cimento Branco
Tel - 244 779 500

8.2 ANEXO 2: Ficha técnica do Material de Mudança de Fase (RT22HC)

Technisches Datenblatt



RT22HC



RUBITHERM® RT ist ein ungebundenes Wärmespeichermaterial und nutzt den Schmelzvorgang fest/flüssig, um bei nahezu konstanter Temperatur große Wärmemengen zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben.

So kann man Wärme und sogar Kälte sehr viel effektiver speichern, als mit allgemein verbreiteten Speichermaterialien.

Alle unsere reinen RT Produkte weisen eine hohe Kristallinität auf, besonders die RTHC Materialien. Hierdurch erreicht man gegenüber herkömmlichen Speichermaterialien eine bis zu 30% höhere Speicherkapazität.

Damit sind für verschiedene Anwendungen selbst bei wenig Raum und kleinen Temperaturdifferenzen große Wärmemengen effektiv nutzbar.

Wir freuen uns Ihre Fragen und Bedürfnisse mit Ihnen zu besprechen.

Merkmale RT Serie:

- hohe Wärmespeicherkapazität, keine Unterkühlung, praktisch chemisch inert
- ein- und ausspeichern der Wärme erfolgen bei nahezu konstanter Temperatur
- hohe Kristallinität, langlebig, zyklusstabil
- für sehr viele Temperaturen stehen die optimalen Speichermaterialien zur Verfügung (von -9°C bis 100°C).
- durch Additive kann eine höhere Viskosität erreicht werden, dies verhindert das Zerfließen beim Aufschmelzen.

Daten im Überblick:

Schmelzbereich

Typische Werte

20-23 [°C]

Maximum: 22

Erstarrungsbereich

23-20 [°C]

Maximum: 22

Wärmespeicherkapazität ± 7,5%

190 [kJ/kg]*

Kombination aus latenter und sensibler Wärme im Temperaturbereich von 14 °C bis 29 °C.

53 [Wh/kg]*

Spezifische Wärmekapazität

2 [kJ/kg·K]

Dichte fest

0,76 [kg/l]

bei 20 °C

Dichte flüssig

0,7 [kg/l]

bei 50 °C

Wärmeleitfähigkeit

0,2 [W/(m·K)]

Volumenausdehnung

12,5 [%]

Flammpunkt

>150 [°C]

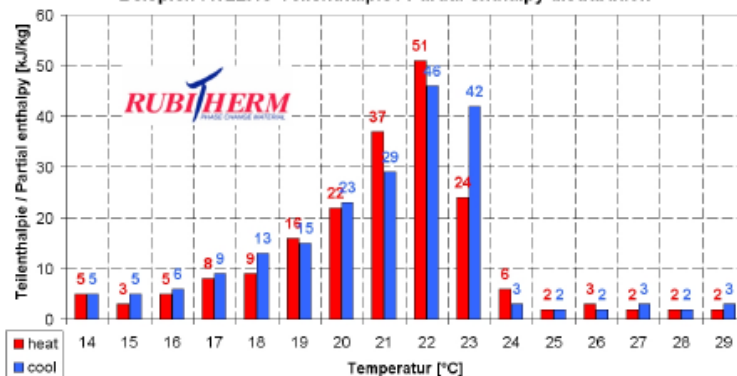
Max. Arbeitstemperatur

50 [°C]



GHS08
H302 May be fatal if swallowed
and enters airways.

Beispiel: RT22HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



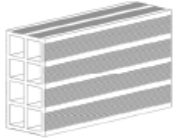
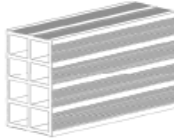
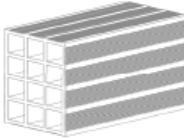
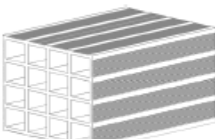


* Ermittelt mittels 3-Schicht-Kalorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
Tel: +49 (30) 7109622-0
Fax: +49 (30) 7109622-22
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

Die Datenblätter sind unverbindliche
Planungshilfen, technische Änderungen
vorbehalten. Stand:
Montag, 6. August 2018

8.3 ANEXO 3: Ficha técnica dos tijolos convencionais

					
PRECERAM – INDÚSTRIAS DE CONSTRUÇÃO, SA TRAVASSO 3101-901 POMBAL 06					
NP EN 771-1:2011+A1:2016 Tijolo cerâmico P, para utilização em alvenaria protegida não resistente, com exposição passiva e requisitos acústicos, térmicos e de resistência ao fogo					
Designação:	30x20X7	30x20X9	30x20X11	30x20X15	30x20X22
Número de referência DdD:	PR302007170610	PR302009170610	PR302011170610	PR302015170610	PR302022170610
Dimensões: Comprimento (mm) Largura (mm) Altura (mm) Tolerância	290 69 189 T1 (±0,4√d)	290 88 189 T1 (±0,4√d)	290 106 189 T1 (±0,4√d)	290 146 189 T1 (±0,4√d)	290 220 189 T1 (±0,4√d)
Configuração:	 Furação horizontal com estrias de reboco	 Furação horizontal com estrias de reboco	 Furação horizontal com estrias de reboco	 Furação horizontal com estrias de reboco	 Furação horizontal com estrias de reboco
Resistência à Compressão: Média Categoria Orientação	≥ 1,9 N/mm² II ⊥ à face do leito	≥ 1,7 N/mm² II ⊥ à face do leito	≥ 1,5 N/mm² II ⊥ à face do leito	≥ 1,5 N/mm² II ⊥ à face do leito	≥ 1,5 N/mm² II ⊥ à face do leito
Teor de sais solúveis ativos:	Categoria S0	Categoria S0	Categoria S0	Categoria S0	Categoria S0
Reação ao fogo:	Euroclasse A1	Euroclasse A1	Euroclasse A1	Euroclasse A1	Euroclasse A1
Permeabilidade vapor de água: Coeficiente de difusão (tabelado)	5/10	5/10	5/10	5/10	5/10
Isolamento som aéreo direto: Massa volúmica bruta Categoria de tolerância Configuração	754 kg/m³ D1 Tal como indicado acima	705 kg/m³ D1 Tal como indicado acima	654 kg/m³ D1 Tal como indicado acima	625 kg/m³ D1 Tal como indicado acima	589 kg/m³ D1 Tal como indicado acima
Resistência térmica:	0,25 m² K/W	0,27 m² K/W	0,29 m² K/W	0,42 m² K/W	0,58 m² K/W
Durabilidade contra o gelo/degelo: Categoria	"Não destinado a ser exposto" F0	"Não destinado a ser exposto" F0	"Não destinado a ser exposto" F0	"Não destinado a ser exposto" F0	"Não destinado a ser exposto" F0
Substâncias perigosas:	DND	DND	DND	DND	DND

8.4 ANEXO 4: Simulador da chuva

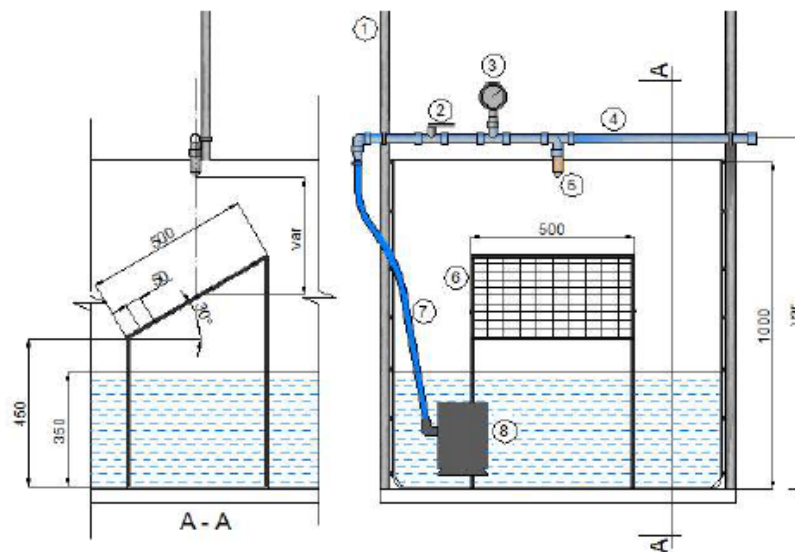


Figura 2 – Simulador de chuvas para teste de degradação (medidas em mm).

- 1 - Estrutura vertical de apoio em tubos de PVC rígido ($\varnothing 1''$) composta de dois apoios verticais fixados no tanque de teste;
- 2 - Válvula de passagem;
- 3 - Medidor de pressão (capac. máx. 600 kPa);
- 4 - Tubulação horizontal para a água em tubo de PVC rígido ($\varnothing 1''$), rosqueável, fixada nos apoios verticais através de braçadeiras que permitem variar a distância de aplicação do jacto. Toda a tubulação possui o mesmo diâmetro para evitar perda de pressão entre as ligações.
- 5 - Bico - *Full Cone Spray*-HH30-30100, (abertura de saída 6.3mm) fabricante *Spraying Systems Co.* posicionado centralmente em relação à face do provete a ser ensaiado.
- 6 - Plataforma de apoio para os provetes em cantoneiras em aço inox (10 mm x 10 mm) e malha vazada (50 mm x 50 mm) para permitir o escoamento da água. Para evitar o deslocamento do provete devido a inclinação da mesa de apoio, uma peça de fixação regulável foi adicionada, o que permite também variar a distância de aplicação sendo mantida a mesma pressão.
- 7 - Bomba submersa. O nível mínimo de água foi estabelecido em função do desempenho da bomba.
- 8 - Mangueira flexível ($\varnothing 1''$)

8.5 ANEXO 5: Resultados dos ensaios de termogravimetria

